

Julia Mançano Quintarelli

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO REJEITO LIBERADO
NO DESASTRE DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO SOBRE OS
CORPOS HÍDRICOS NA REGIÃO DE BRUMADINHO-MG**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2020



UFRJ

Julia Mançano Quintarelli

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO REJEITO LIBERADO
NO DESASTRE DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO SOBRE OS CORPOS
HÍDRICOS NA REGIÃO DE BRUMADINHO-MG**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadores:

D. Sc. Gerson Cardoso da Silva Jr.
M. Sc. Eduardo Paim Viglio

Rio de Janeiro

2020

JULIA, Mançano Quintarelli

Avaliação da influência do rejeito liberado no desastre da mina Córrego do Feijão sobre os corpos hídricos na região de Brumadinho-MG / Julia Mançano Quintarelli - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2020.

xii, 67 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2020.

Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Junior, Eduardo Paim Viglio

1. Geologia. 2. Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Gerson, Cardoso da Silva Júnior. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Avaliação da influência do rejeito liberado no desastre da Mina Córrego do Feijão sobre os corpos hídricos na região de Brumadinho-MG.

Julia Mançano Quintarelli

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO REJEITO LIBERADO
NO DESASTRE DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO SOBRE OS CORPOS
HÍDRICOS NA REGIÃO DE BRUMADINHO-MG

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientadores:

Prof. D.Sc. Gerson Cardoso da Silva Jr.
M.Sc. Eduardo Paim Viglio

Aprovada em: 22.10.2020

Por:

Orientador: D.Sc. Gerson Cardoso da Silva Jr. (UFRJ)

Orientador: M.Sc. Eduardo Paim Viglio (SGB/CPRM)

D.Sc. Cícera Neysi de Almeida (UFRJ)

D.Sc. Cássio Roberto da Silva (SGB/CPRM)

UFRJ
Rio de Janeiro
2020

AGRADECIMENTOS

Minha eterna gratidão a todos os meus professores porque sem eles nada disso seria possível, em especial ao meu orientador Gerson Cardoso, pela paciência, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento desse trabalho e à professora Silvia Medeiros, por todo o incentivo e dedicação durante meus primeiros passos como geocientista.

Agradeço aos amigos que fiz durante esses anos de UFRJ, mesmo àqueles que hoje não tenho mais tanto contato, obrigada por tudo que somamos, por todas as experiências, aprendizados, perrengues de campo e risadas. A graduação sem vocês certamente não seria a mesma.

Agradeço também à toda equipe do Departamento de Gestão Territorial (RJ) do SGB/CPRM, que possibilitou a minha participação no monitoramento realizado no rio Paraopeba após o rompimento da barragem I em janeiro de 2019, servindo este de inspiração e fonte de dados para o presente trabalho. Agradeço em especial aos pesquisadores Eduardo Viglio, um dos orientadores deste trabalho, e Cássio Silva, que me acolheram como parte da equipe e me ensinaram tudo o que puderam durante meu período de estágio, ao técnico Marco Antônio e ao geólogo José Luiz Marmos, pelos ensinamentos e parceria nos campos e às pessoas da SUREG-BH pelo acolhimento durante as etapas de escritório das campanhas. Agradeço também a equipe do LAMIN-RJ por disponibilizarem o seu tempo para me mostrar como são feitas as análises de água.

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Márcia, e ao meu pai, Charles, pelo apoio e por sempre buscarem dar o melhor de si para me ajudar nessa fase da vida. Ao meu irmão Pedro, que apesar de exercer com maestria sua função de irmão mais novo, sempre esteve ao meu lado para o que fosse preciso. Aos meus primos Felipe e Bruna por serem presentes nesse processo e estarem sempre dispostos a ajudar no que fosse necessário. Agradeço, também, ao Jônatas, meu parceiro para tudo nessa vida, por todo o apoio emocional e incentivo durante os altos e baixos que apareceram nessa reta final da graduação.

“O homem não teceu a teia da vida: ele é apenas um fio dessa teia. O que quer que ele cause à teia, causa a si mesmo” (Chefe Seattle)

RESUMO

QUINTARELLI, Julia Mançano. **Avaliação da influência do rejeito liberado no desastre da mina Córrego do Feijão sobre os corpos hídricos na região de Brumadinho-MG**. 2020. xii, 67 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Em 25/01/2019 ocorreu em Brumadinho, no estado de Minas Gerais, o rompimento da Barragem 1 da mina Córrego do Feijão, uma tragédia de grandes dimensões que deixou muitas vítimas fatais, além de impactos ambientais e sociais. No presente trabalho analisaram-se os elementos dissolvidos na água superficial e no sedimento de fundo do curso d'água diretamente afetado pelo desastre, o ribeirão Ferro-Carvão, e em pontos a montante e a jusante da confluência com o rio principal da região (rio Paraopeba). Analisou-se também o rejeito liberado e duas amostras de água subterrânea em um bairro diretamente afetado pelo desastre em Brumadinho. O estudo da composição do rejeito e do sedimento visou a identificação de elementos indicadores da presença ou ausência de rejeito nas águas da região, para que fosse possível mensurar o impacto da tragédia do âmbito da geoquímica ambiental dos meios amostrados. Os resultados indicam que o dano, do ponto de vista geoquímico, não teve um impacto tão catastrófico quanto os demais, como perdas humanas e materiais, danos à biota, etc. As amostras de água subterrânea não apresentaram inconformidades de acordo com a resolução CONAMA 396, e boa parte das amostras de água superficial que ultrapassaram o VMP da CONAMA 357 para rios de Classe 2 estão à montante do local atingido, o que indica que o rio já estava previamente impactado por outras fontes distintas das originadas pelo rompimento. Considerando essa informação, percebe-se a grande importância do conhecimento do *background* geoquímico como um dos parâmetros que permitem mensurar o impacto antrópico em eventos desse tipo, além de ser uma excelente ferramenta na remediação de situações como a da Mina Córrego do Feijão.

Palavras-chave: Mina de ferro do Córrego do Feijão; geoquímica ambiental; qualidade da água.

ABSTRACT

QUINTARELLI, Julia Mançano. **Evaluation of the influence of the tailings released in the Córrego do Feijão mine disaster on the water bodies of Brumadinho / MG, Brazil.** 2020. xii, 67 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

On 01/25/2019 in Brumadinho, state of Minas Gerais, Brazil, the rupture of tailing Dam 1 of the Córrego do Feijão iron mine represented a major tragedy that left many fatal victims, in addition to huge environmental and social impacts. In the present work, we analyzed the elements dissolved in the surface water and the bottom sediments of Ferro-Carvão stream, the watercourse directly affected by the disaster, and at points upstream and downstream after the confluence with the region's main river (Paraopeba River). We also analyzed the released tailings and two samples of groundwater in a neighborhood directly affected by the disaster in Brumadinho. The study of the composition of the tailings and sediments aimed to identify elements that could indicate the presence or absence of tailings in the waters of the region, so that it was possible to measure the impact of the tragedy from the environmental geochemistry standpoint in the sampled media. The results indicate that the damage, from an environmental geochemical perspective, was not as catastrophic as the others, such as human and material losses, damage to biota, etc. Groundwater samples did not present any non-conformities according to CONAMA (Brazilian Environmental Council) Resolution 396, and most of the surface water samples that exceeded the CONAMA 357 MCL for Class 2 Rivers are upstream of the reached location, which indicates that the river had already been previously impacted by sources other than the disaster. Considering this information, the great importance of the knowledge of the geochemical background is perceived as a parameter that allows effectively assessing the real anthropic impact in events of this type. In addition, it represents an excellent tool in the remediation of situations such as that of the Córrego do Feijão Iron Mine disaster.

Keywords: Córrego do Feijão iron mine; Environmental geochemistry; Water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Localização da área de estudo com a delimitação da área ocupada pelo rejeito (área marrom). O retângulo vermelho indica a área de abrangência da Figura 2.	14
Figura 2 – Imagens antes (A) e depois (B) do rompimento da barragem I da Mina Córrego do Feijão. Nela observam-se as duas localidades próximas ao ribeirão que foram parcialmente afetadas após o rompimento. (Fonte: Google Earth – modificada pela autora).	15
Figura 3 - Localização das estações de coleta.....	18
Figura 4 - (a) aparelho OAKTON PCD650; (b) tubos de coleta de cátions e ânions; (c) coleta das amostras de água superficial.	19
Figura 5 - (a) escolha do local para lançar o amostrador; (b) peneiramento do sedimento coletado para armazenar a fração mais fina.	20
Figura 6 - Coleta das amostras de rejeito.	20
Figura 7 - O gráfico representa o comportamento médio da chuva ao longo do ano. Essas médias são valores calculados a partir de uma série de dados de 30 anos observados. É possível identificar as épocas mais chuvosas/secas. (Fonte: CLIMATEMPO, 2020)	23
Figura 8 - Gráfico da pluviosidade x nível d'água na estação telemétrica de Alberto Flores no período de 1 ano (Fonte: ANA)	24
Figura 9 - Mapa regional do cráton São Francisco com destaque para a localização do Quadrilátero Ferrífero (QF, ver figura 10). (Fonte: modificado de Alkmin & Marshak (1998)).	27
Figura 10 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero mostrando a distribuição das quatro grandes unidades geológicas e principais estruturas. O retângulo vermelho representa a localização aproximada da área de estudo. (Fonte: modificado de Alkmin & Marshak (1998)).....	27
Figura 11 - Mapa geológico simplificado da área de estudo, somente com as unidades litoestratigráficas principais. A linha amarela que indica a seção é referente à Figura 23.	28
Figura 12 - Mapa hidrogeológico com a representação dos Sistemas Aquíferos aflorantes da área de estudo (fonte: ANA).	31
Figura 13 - Fotografia panorâmica da mina Córrego do Feijão em 2005. No canto inferior direito tem-se a Barragem 1. (Fonte: GIRODO, 2005)	32
Figura 14 - Representação gráfica do box-plot (RODRIGUES & NALINI, 2009). - ...	35
Figura 15 - Diagrama da mobilidade os elementos em relação ao potencial iônico (carga iônica/raio iônico) (Fonte: ROSE et al., 1979 apud LICHT, 1998).	36
Figura 16 - Rejeito depositado no ribeirão Ferro-Carvão (reprodução própria).....	40
Figura 17 - Possíveis elementos indicadores da presença de rejeito.....	43
Figura 18 - Concentração de ferro das amostras nos meses de fevereiro e julho de 2019.	50
Figura 19 - Concentração de manganês das amostras em fevereiro e julho.	50
Figura 20 - Concentração de estrôncio nas amostras em fevereiro e julho de 2019.	51
Figura 21 - Diagrama de Piper para as amostras de água subterrânea.....	53
Figura 22 (A e B) - Gráficos obtidos do balanço hídrico. (A) representa a precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real. (B) representa o período de excedente e de déficit hídrico na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.	55

Figura 23 - Seção esquemática simplificada da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com setas indicando a direção e intensidade do fluxo (localização marcada na figura 11).	56
Figura 24 - Gráfico comparativo da concentração de Fe, Mn e Sr em água superficial.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - pH de hidrólise de alguns elementos (fonte: ROSE et al., 1979 apud LICHT,1998)	36
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do material resultante do rompimento ("rejeito").	41
Tabela 2 - Resultados analíticos de sedimento de fundo da Campanha 2 (fev/2019).	44
Tabela 3 - Resultados analíticos de sedimento de fundo da Campanha 4 (jul/2019).	45
Tabela 4 - Resultados analíticos de água superficial da Campanha 2 (fev/2019).	47
Tabela 5 - Resultados analíticos de água superficial da Campanha 4 (julho/2019). NA = não analisado.	48
Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos medidos no local para as campanhas de fevereiro e julho de 2019.	51
Tabela 7 - Resultados analíticos de água subterrânea coletada durante a campanha 4 (jul/2019).	54
Tabela 8 - Dados de referência de análises anteriores ao rompimento da Barragem. (Atlas BSF e APA Sul).	58

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE QUADROS.....	X
LISTA DE TABELAS	X
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Localização	14
1.2 Objetivos	16
2. MATERIAIS E MÉTODOS	17
2.1 Trabalhos de Campo	17
2.2 Análises de Laboratório.....	21
2.3 Processamento dos dados.....	22
2.4 Pesquisa bibliográfica	22
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	23
3.1 Aspectos fisiográficos	23
3.1.1 Clima.....	23
3.1.2 Hidrografia	24
3.1.3 Relevo.....	25
3.1.4 Cobertura e uso do solo.....	26
3.2. Aspectos geológicos e hidrogeológicos.....	26
3.2.1 Geologia	26
3.2.2 Hidrogeologia.....	30
3.3 Mineração na região.....	31
4. CONCEITOS BÁSICOS.....	33

4.1 Geoquímica Ambiental.....	33
4.1.1 <i>Background</i> geoquímico	33
4.1.2 Mobilidade dos elementos	35
4.2 Hidrogeoquímica	37
4.2.1 Parâmetros físico-químicos	37
4.2.2 Constituintes iônicos principais, secundários, traços, tóxicos e carcinógenos	37
4.2.3 Diagrama de Piper	38
4.3 Estimativa da contribuição dos aquíferos à vazão de rios: balanço hidrometeorológico pelo método Thornthwaite	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Material resultante do rompimento (rejeito).....	40
5.2 Sedimento de fundo	42
5.3 Água superficial	46
5.4 Água subterrânea	52
5.4.1 Análises Químicas	52
5.4.2 Balanço Hídrico	55
5.5 Valores de <i>Background</i> de água superficial da bacia do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão.....	56
6. CONCLUSÃO	59
7. REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A	64
APÊNDICE B	67

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da evolução humana os bens minerais possuem estreita ligação com o desenvolvimento econômico e social, ligação tão significativa e importante que diferentes eras da pré-história da humanidade receberam o nome do material mais importante em cada uma delas, desde a Idade da Pedra, dividida em Pedra Lascada (Paleolítico) e Pedra Polida (Neolítico), até a Era dos Metais, dividida em Idade do Cobre, do Bronze e do Ferro (NAVARRO, 2006). Além disso, é inegável a importância – e dependência – dos bens minerais para a sociedade atual: ela não funcionaria sem eles. A forma de explorar esses bens é através da mineração. Todas as coisas que se consomem, em algum momento, em maior ou menor grau necessitam de bens minerais ou de algum material originário deles.

Contudo, apesar de imprescindível, a indústria mineral produz uma grande quantidade de resíduos. O principal resíduo de mineração é o rejeito – misturas de rochas trituradas e fluidos de processamento de moinhos, lavagens e outros processos, que permanecem após a extração de bens minerais – que são muitas vezes armazenados em barragens, designadas como ‘barragens de rejeitos’, que podem falhar (sofrer ruptura) e, conseqüentemente, gerar impactos ambientais, sociais e econômicos (KOSSOFF, 2014). Vários acidentes têm ocorrido em todo o mundo nessas estruturas, alguns com conseqüências sociais, econômicas e ambientais desastrosas, inclusive no Brasil. Um exemplo dessa situação de severos impactos decorrentes da mineração ocorreu na mina Córrego do Feijão, localizada na Serra do Curral, no bairro homônimo Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG.

No dia 25 de janeiro de 2019 por volta das 12h30min ocorreu o rompimento da Barragem 1 da mina Córrego do Feijão, uma tragédia de grandes dimensões que deixou mais de 250 vítimas fatais, dentre elas funcionários da mineradora e moradores da região, além de impactos ambientais e sociais. A área ocupada pelo rejeito após o rompimento, de acordo com a delimitação obtida através de imagem de satélite (ver localização nas figuras 1 e 2), tinha 3,2 km² e restringiu-se à bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Os bairros mais afetados foram Parque das Cachoeiras e Córrego do Feijão.

O rompimento da barragem, de acordo com o relatório do painel de especialistas (ROBERTSON et al., 2019), foi um evento único, em que a ruptura inicial foi relativamente rasa e seguida de uma série de deslizamentos rápidos e rasos que

foram progredindo para trás até os rejeitos. O rompimento foi resultado da liquefação estática dos materiais da barragem, que se comportavam de forma frágil. Como possíveis gatilhos têm-se: a) a má drenagem na estrutura da barragem, desde a sua construção, que resultou em um aumento do nível d'água; b) a inclinação íngreme do talude da barragem, com os alteamentos sucessivos que foram ocorrendo ao longo da vida útil da mina; e c) a natureza e forma de deposição dos rejeitos, que geraram uma tensão significativa dentro da barragem culminando no seu rompimento.

1.1 Localização

A área de estudo, que possui um total de 206 km², está localizada no estado de Minas Gerais e abrange parte dos municípios de Brumadinho e Mário Campos (Figura 1). Por sua vez, aqueles municípios fazem parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

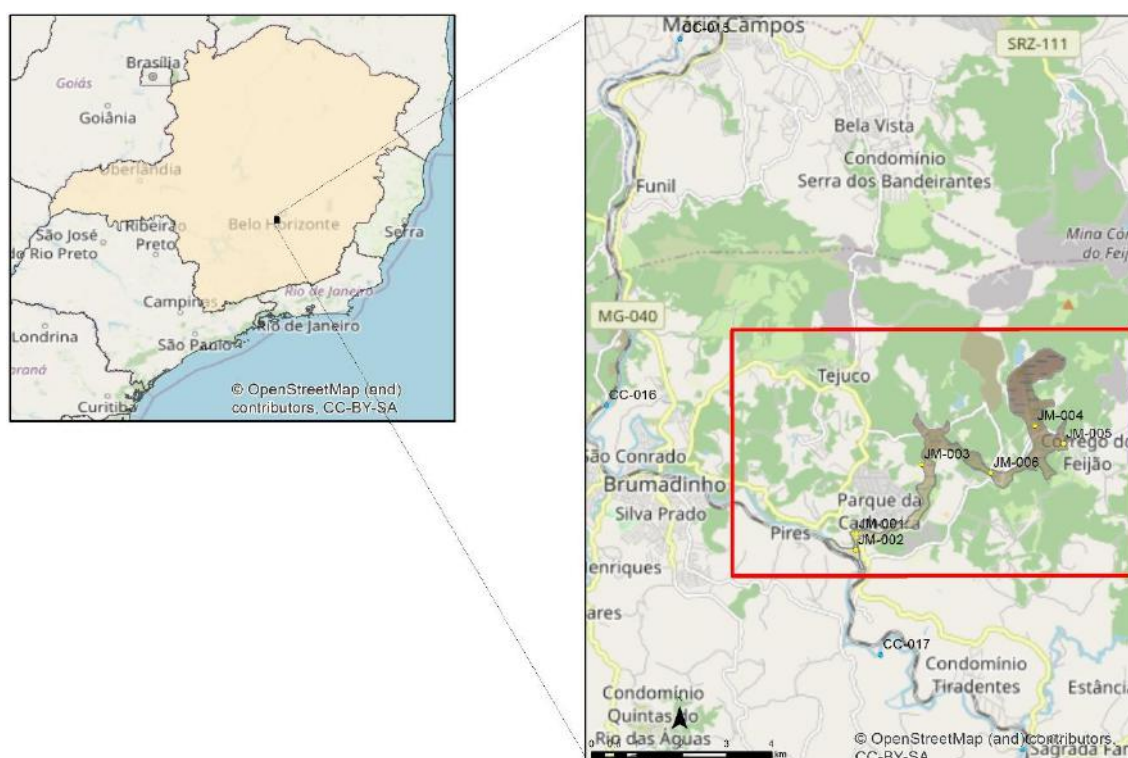


Figura 1– Localização da área de estudo com a delimitação da área ocupada pelo rejeito (área marrom). O retângulo vermelho indica a área de abrangência da Figura 2.

A área de estudo foi a primeira a ser impactada com o rejeito proveniente da barragem. Sua delimitação incluiu 10 de 21 estações de coleta de amostras definidas

pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM/SGB) durante o Monitoramento Especial do Rio Paraopeba, iniciado após o rompimento da barragem: duas estações a montante da foz do ribeirão Ferro-Carvão, duas a jusante e as seis restantes correspondem à área afetada pelo rejeito.



Figura 2 – Imagens antes (A) e depois (B) do rompimento da barragem I da Mina Córrego do Feijão. Nela observam-se as duas localidades próximas ao ribeirão que foram parcialmente afetadas após o rompimento. (Fonte: Google Earth – modificada pela autora).

1.2 Objetivos

Este trabalho final de curso tem como objetivo uma avaliação das consequências da interação do rejeito liberado no acidente da Mina Córrego do Feijão com a água superficial e subterrânea da região de Brumadinho-MG, à luz da abordagem da Geoquímica Ambiental e da Hidrogeoquímica. Como objetivos complementares, podem-se incluir:

- obter os valores de *background* geoquímico locais, para efeitos comparativos;
- enfatizar a importância do conhecimento prévio da composição química das águas, sedimentos e solos do território brasileiro na gestão em casos de prevenção e remediação de problemas causados por agentes antrópicos e/ou naturais.
- análise preliminar simplificada das características hídricas e hidrogeológicas da bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho contou com dados obtidos pela CPRM/SGB, sendo sua metodologia dividida em trabalhos de campo, análise química em laboratório, processamento de dados e pesquisa bibliográfica em geral. Os dados disponíveis na bacia do rio Paraopeba foram restringidos, local e temporalmente, haja vista a grande possibilidade de variação dos resultados com as intervenções feitas posteriormente aos levantamentos de campo, com o objetivo de recuperar a área afetada. O intervalo de tempo abrangido pelo estudo refere-se à segunda e quarta campanhas do Monitoramento Especial do Rio Paraopeba realizadas pela CPRM/SGB, respectivamente, dos dias 11/02/2019 a 22/02/2019 e 24/07/2019 a 01/08/2019. Essas campanhas foram realizadas com a participação da autora sob orientação do coorientador deste Trabalho de Conclusão de Curso, Pesquisador Eduardo Paim Viglio, e representam, respectivamente, o período úmido e o período seco na área de estudo. No total, contudo, foram executadas cinco campanhas de campo como parte do projeto de monitoramento da CPRM/SGB.

2.1 Trabalhos de Campo

Durante a etapa de campo foram coletadas amostras de água subterrânea, água superficial, sedimento de fundo e rejeito (Figura 3), com espaçamento de cerca de 10 km em linha reta ao longo do rio Paraopeba (no caso da água superficial e sedimento de fundo). Na área da bacia do ribeirão Ferro-Carvão as amostras foram coletadas na chamada “Zona Quente”, delimitada pela Defesa Civil, sendo necessária a autorização prévia para ter acesso, e as estações de coleta foram escolhidas de modo que sua distribuição representasse uma visão geral do local. As amostras de água subterrânea foram coletadas nos poços disponibilizados pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) no bairro Parque das Cachoeiras, uma das localidades afetadas.

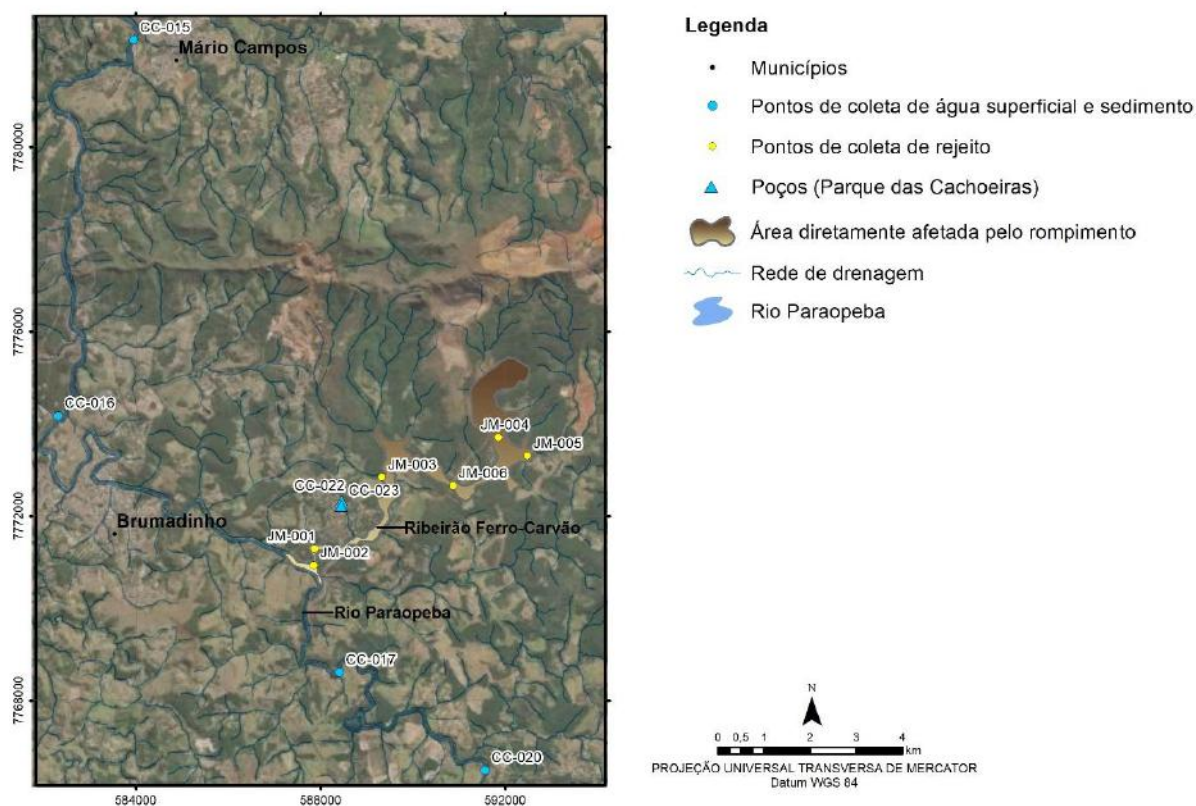


Figura 3 - Localização das estações de coleta.

Durante a primeira etapa de campo (referente à Campanha 2 do Monitoramento Especial do Rio Paraopeba), ocorrida no verão (fevereiro de 2019, cerca de duas semanas após o rompimento), foram coletadas cinco amostras de água superficial e quatro de sedimento de fundo do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão, além de seis amostras do rejeito na bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Na segunda etapa de campo (referente à Campanha 4 do Monitoramento Especial do Rio Paraopeba), ocorrida no inverno (julho de 2019), além das amostras de água superficial e sedimento de fundo, foram coletadas amostras de água em dois poços pertencentes à COPASA no bairro de Parque das Cachoeiras, em Brumadinho. Nessa etapa não foram coletadas amostras de rejeito devido a intensa remobilização do material após obras e trabalhos de buscas.

As amostras de água (superficial e subterrânea) foram coletadas em recipientes ambientalizados, ou seja, lavados com a própria água a ser amostrada, através de seringas descartáveis, filtradas com filtro Micropore de 0,45µm e acondicionadas em

dois tubos de polietileno de 50 ml, um para cátion (identificado com fita vermelha) e outro para ânion (identificado com fita amarela) (Figura 4). No tubo destinado à análise de cátion foram adicionados 2 ml de HNO_3 1:1, para a preservação dos cátions solúveis nas amostras. As amostras de água foram mantidas sob refrigeração até o momento da análise. Adicionalmente foram medidos com o aparelho OAKTON PCD650 quatro parâmetros físico-químicos: pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura.



Figura 4 - (a) aparelho OAKTON PCD650; (b) tubos de coleta de cátions e ânions; (c) coleta das amostras de água superficial.

As amostras de sedimentos de fundo foram coletadas de forma composta (em mais de um local no entorno do ponto de coleta de água) com amostrador de arrasto feito de aço inox ou com colheres e bacias plásticas, peneiradas quando necessário e acondicionadas em sacos plásticos posteriormente lacrados e identificados (Figura 5).

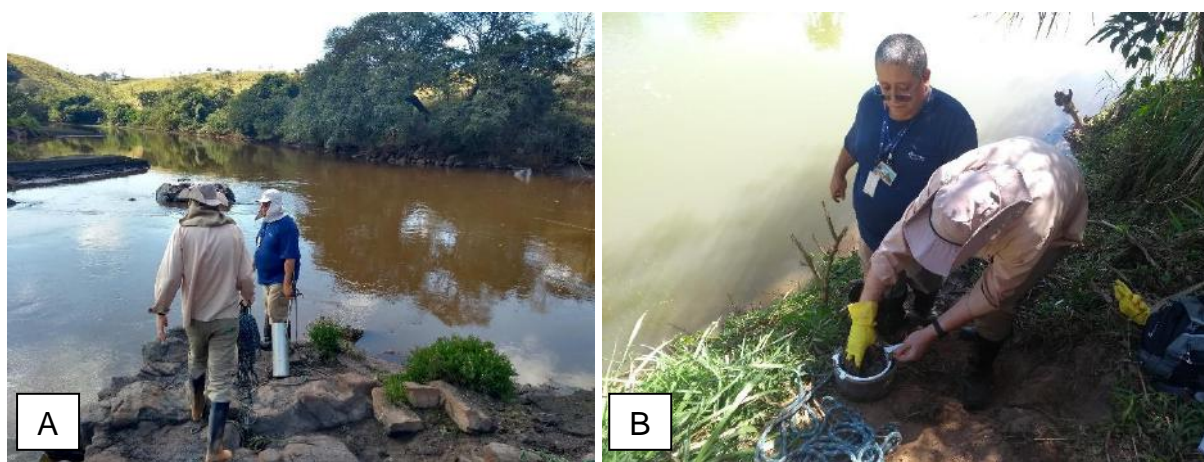


Figura 5 - (a) escolha do local para lançar o amostrador; (b) peneiramento do sedimento coletado para armazenar a fração mais fina.

As amostras do rejeito presente na bacia do Ribeirão Ferro-Carvão foram coletadas em seis pontos diferentes com o auxílio do trado. Foram descartados os primeiros 20 cm de rejeito e cerca de 1 a 2 kg de material da parte inferior foi acondicionado em sacos plásticos, identificados e lacrados (Figura 6).



Figura 6 - Coleta das amostras de rejeito.

2.2 Análises de Laboratório

As amostras de água, tanto superficial quanto subterrânea, foram analisadas no Laboratório de Análises Minerais/LAMIN nas filiais do Rio de Janeiro e Manaus, e as técnicas analíticas utilizadas foram Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) para 29 cátions (Ag, Al, As, B, Be, Ba, Ca, Co, Cd, Cu, Cr, Li, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Se, Si, Sb, Sn, Sr, Ti, V e Zn), Cromatografia de Íons para 7 ânions (fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato e fosfato) e alcalinidade pelo método potenciométrico.

A exemplo da análise das amostras de água subterrânea, serão descritos nos parágrafos seguintes os procedimentos seguidos durante as análises de ânions, cátions e alcalinidade, que a autora acompanhou no LAMIN-RJ.

Como dito anteriormente, os ânions foram analisados pela técnica de Cromatografia Iônica, no cromatógrafo iônico modular Metrohm utilizando a coluna de separação Metrosep A Supp 5. A cromatografia iônica é um método de separação que utiliza uma fase móvel, o eluente (carbonato de sódio 3,6 mM), que leva a amostra de água até a coluna de separação (fase estacionária), em que ocorre a separação dos ânions. Os ânions possuem um tempo específico de retenção na coluna e ao sair dela são carregados para o detector de condutividade. O produto final são cromatogramas de condutividade vs. tempo de retenção, em que cada ânion tem seu tempo e condutividade específicos, permitindo uma análise quali-quantitativa.

Os cátions foram analisados pela técnica ICP-OES no espectrômetro ICP Optima 7300 (Perkin Elmer). Esta é uma técnica analítica que se baseia na medida da emissão de radiação eletromagnética das regiões visível e ultravioleta do espectro eletromagnético por átomos neutros ou átomos ionizados excitados.

A alcalinidade foi obtida utilizando o método potenciométrico, através do equipamento 848 Tritrino Plus com solução de H_2SO_4 0,02N para amostras com condutividade até 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 0,1N para amostras com condutividade acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

As amostras de sedimento de fundo na etapa de laboratório foram secas a 60°C, peneiradas a 80 mesh, sendo o passante moído a 150 mesh e analisado por ICP-MS

(Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado) para 54 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Yb, Zn e Zr) após digestão por água régia. As análises foram feitas por laboratório externo e não tiveram a participação da autora. Devido aos elevados teores de Fe e Mn (quase todos acima do limite máximo de detecção do método ICP-MS), estes dois elementos foram quantificados através do método XRF (Fluorescência de Raios X com fusão com tetraborato de lítio) para serem melhor interpretados. A análise do rejeito seguiu o mesmo padrão para sedimento de fundo.

2.3 Processamento dos dados

Durante a etapa de escritório foram feitas as interpretações dos resultados analíticos de água superficial, água subterrânea, sedimento de fundo e rejeito. Foram utilizados softwares ArcGis 10.6, Qualigraph, Excel, Google Earth e Corel Draw, para elaboração de mapas de localização e geológicos, interpretação hidrogeoquímica, elaboração de gráficos e planilhas e realização do balanço hídrico, aquisição de imagens de satélite e elaboração da seção geológica simplificada, respectivamente.

2.4 Pesquisa bibliográfica

Presente durante todo o processo, a etapa de pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento e leitura de artigos, relatórios e livros relacionados a hidrogeoquímica, geologia, geoquímica ambiental e todos os outros temas abordados, servindo como a base de redação e discussões do presente trabalho.

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Aspectos fisiográficos

3.1.1 Clima

De acordo com dados da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Brumadinho (BRUMADINHO, 2015), a região está localizada numa zona de influência do clima Cwa (Subtropical ou tropical de altitude, chuvoso e quente), com verões quentes e chuvosos e invernos secos, e do clima Cwb (Subtropical ou tropical de altitude, chuvoso, moderadamente quente), com temperaturas moderadas, verões chuvosos e invernos secos.

A região possui uma notável variação na temperatura entre as estações do ano, por estar sob o domínio do Clima Subtropical de Altitude, e também marcada variação pluviométrica sazonal, caracterizando uma área de transição para o bioma Cerrado. Nos meses mais frios, a temperatura mínima média fica em torno de 12°C e 13°C. Nos meses mais quentes, as temperaturas máximas médias chegam a aproximadamente 27°C. A região possui a menor precipitação média no mês de julho (9 mm) e maior no mês de dezembro (320 mm), de acordo com a média histórica de 30 anos de medição (CLIMATEMPO, 2020), como pode ser observado na figura 7.

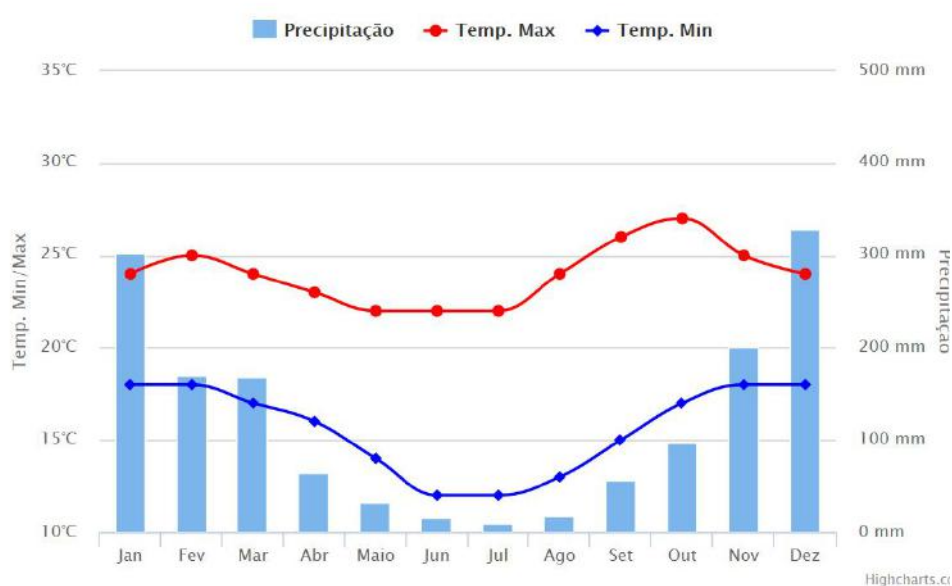


Figura 7 - O gráfico representa o comportamento médio da chuva ao longo do ano. Essas médias são valores calculados a partir de uma série de dados de 30 anos observados. É possível identificar as épocas mais chuvosas/secas. (Fonte: CLIMATEMPO, 2020)

A partir do gráfico da figura 8, que representa a pluviosidade (mm) e nível de água (cm) do rio Paraopeba ao longo de um ano (01/08/2018 – 01/08/2019) na estação telemétrica de Alberto Flores, pode-se observar que nos meses de junho a agosto a pluviosidade foi nula ou extremamente baixa, enquanto nos meses de novembro a março a pluviosidade foi mais elevada.

Outro aspecto a ser observado neste gráfico é o nível do rio Paraopeba nessa localidade, que em seu nível mais baixo fica em torno de 120 cm e o nível mais alto foi em torno de 700 cm, justamente no dia do rompimento da barragem. Esse fato ocorreu devido ao barramento provocado pelo material que resultou na elevação do nível de água a montante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba.

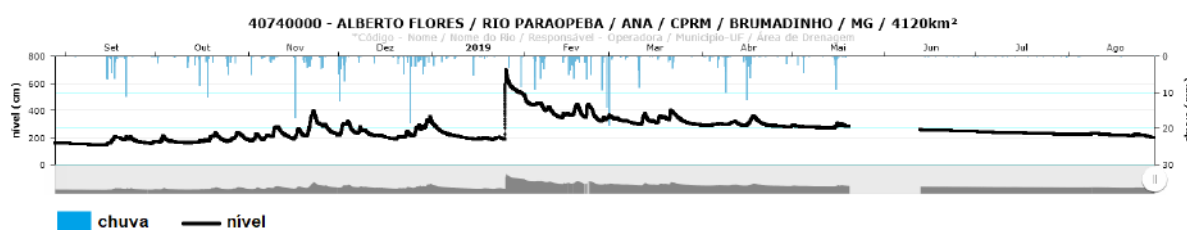


Figura 8 - Gráfico da pluviosidade x nível d'água na estação telemétrica de Alberto Flores no período de 1 ano (Fonte: ANA)

3.1.2 Hidrografia

O ribeirão Ferro-Carvão faz parte da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, sendo um afluente em sua margem direita. O rio Paraopeba, por sua vez, é afluente da margem direita do rio São Francisco.

A bacia do rio Paraopeba possui 12.054,25 km² e abrange 48 municípios de Minas Gerais (IGAM, 2019). A sub-bacia do Ribeirão Ferro-Carvão possui uma área de aproximadamente 32 km². De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão de Águas – IGAM (2019), os principais usos da água na bacia do rio Paraopeba na região de Brumadinho a jusante são para agropecuária, abastecimento público, geração de energia e indústria.

De acordo com a Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995, que dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba, o

ribeirão Ferro-Carvão, das nascentes até a confluência com o rio Paraopeba, é classificado como Classe 2, assim como o leito principal do rio Paraopeba (a partir da confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias). Como especificado na resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, o termo classe 2 refere-se a águas que podem ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e e) à aquicultura e à atividade de pesca.

3.1.3 Relevô

Medina et al. (2005) definiram três unidades morfoestruturais na área de estudo: Crista Monoclinal da Serra do Curral (CSC), Platô da Sinclinal Moeda (PSM), e Depressão Marginal do Rio Paraopeba (DPA).

A Crista Monoclinal da Serra do Curral (CSC) possui cristas dominantes com cotas elevadas que chegam a 1400 m, alinhadas na direção WSW-ENE, com amplitude topográfica entre 300 e 500 m. A densidade de drenagem é expressiva e o padrão varia de dendrítico à treliça. A CSC apresenta as seguintes denominações locais: serra dos Três Irmãos, serra do Cachimbo, serra do Curral e serra do Taquaril.

O Platô da Sinclinal Moeda (PSM) é uma grande superfície suspensa na direção N-S com altitudes que variam entre 1500 e 1600 m sustentada, na área de estudo, por itabiritos da Formação Cauê (item 3.2.1). No topo apresenta cristas ou platôs capeados por canga, chegando a larguras entre 500 e 1300 m e delimitados por escarpas abruptas que apresentam amplitude de relevo, em geral, superiores a 400 m. O PSM apresenta as seguintes denominações locais: serra da Moeda e serra de Itabirito.

A Depressão Marginal do Rio Paraopeba (DPA) apresenta relevo ondulado com cotas que chegam a 1000 m, com desníveis variando de 60 a 120 m e média densidade de drenagem de padrão dendrítico a subdendrítico. É uma unidade

rebaixada em relação às anteriores e é suportada por rochas granitoides do Complexo Ortognáissico (Complexo do Bonfim).

3.1.4 Cobertura e uso do solo

A área de estudo está localizada em uma região de domínio da Floresta Estacional Semidecidual, em transição para o Cerrado, com domínio do bioma Mata Atlântica.

O uso do solo consiste principalmente em: agropastoril (maior percentual do território do município); capoeira (vegetação de capoeira); floresta nativa; urbano; campo natural; mineração; campo rupestre; reflorestamento; afloramento rochoso; represa do rio Manso (reservatório da COPASA) (BRUMADINHO, 2015). Além disso a área de estudo abrange parte da Área de Proteção Ambiental APA Sul – RMBH.

3.2. Aspectos geológicos e hidrogeológicos

3.2.1 Geologia

A área de estudo está inserida no Quadrilátero Ferrífero, localizado geologicamente na porção sudeste do cráton São Francisco (Figura 9) e geograficamente na porção centro – sul do estado de Minas Gerais.

O Quadrilátero Ferrífero é formado por rochas arqueanas e proterozoicas agrupadas em quatro grandes unidades geológicas (Figura 10): Complexo Granito-gnáissico (TTGs), Supergrupo Rio das Velhas (ambos Arqueanos), Supergrupo Minas (Paleoproterozoico) e Grupo Itacolomi (Paleoproterozoico) (DOOR, 1969).

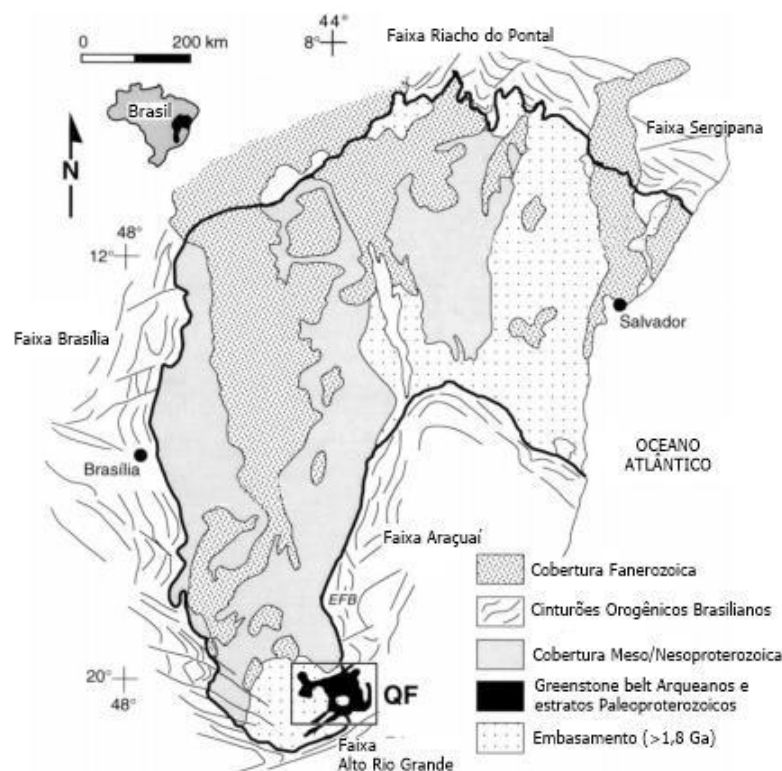


Figura 9 - Mapa regional do cráton São Francisco com destaque para a localização do Quadrilátero Ferrífero (QF, ver figura 10). (Fonte: modificado de Alkmin & Marshak (1998).

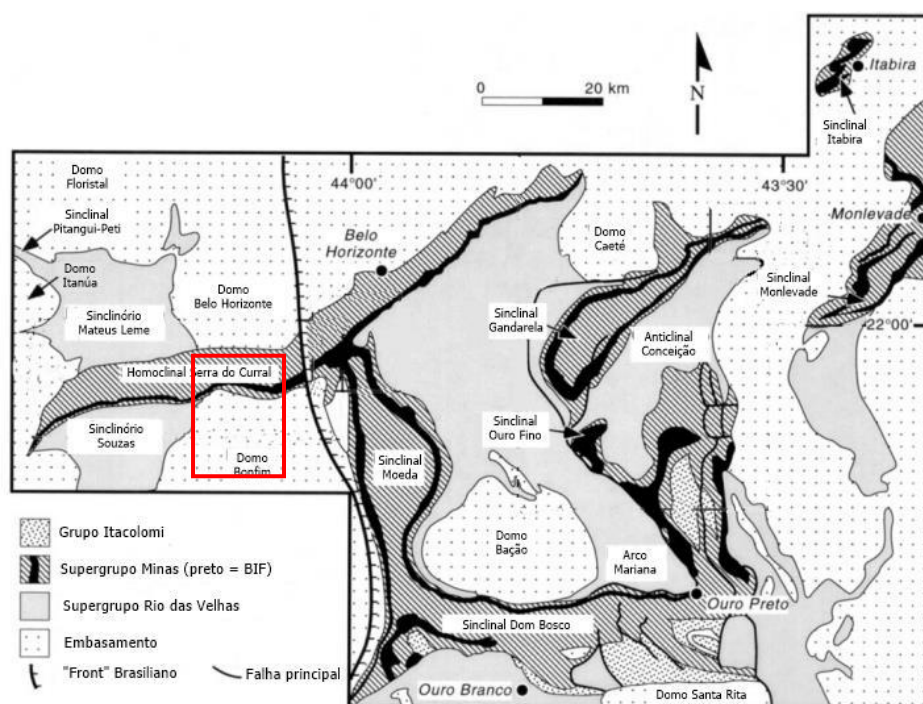


Figura 10 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero mostrando a distribuição das quatro grandes unidades geológicas e principais estruturas. O retângulo vermelho representa a localização aproximada da área de estudo. (Fonte: modificado de Alkmin & Marshak (1998).

De acordo com Uhlein & Noce (2012), as unidades geológicas do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas mostram diversas fases da evolução daquela região que, de forma simplificada, começa com a formação de uma bacia vulcanossedimentar, durante o Arqueano, seguida pela formação de bacia sedimentar com pouco ou nenhum vulcanismo durante o Paleoproterozoico. Essas unidades foram envolvidas em eventos de orogênese e passaram por dobramento e metamorfismo, que culminaram na formação de cadeias montanhosas. Por fim, como consequência do proeminente relevo formado deu-se início a erosão e aos poucos iniciou-se novo ciclo, com formação de bacia, orogênese, formação de relevo e erosão, sucessivamente.

A seguir serão brevemente descritas as unidades presentes na área de estudo. São elas: rochas do complexo granito-gnáissico (representados pelo Complexo Belo Horizonte e Complexo Bonfim – inclui o gnaissé Sousa Noschese) e rochas do Supergrupo Minas (Figura 11).

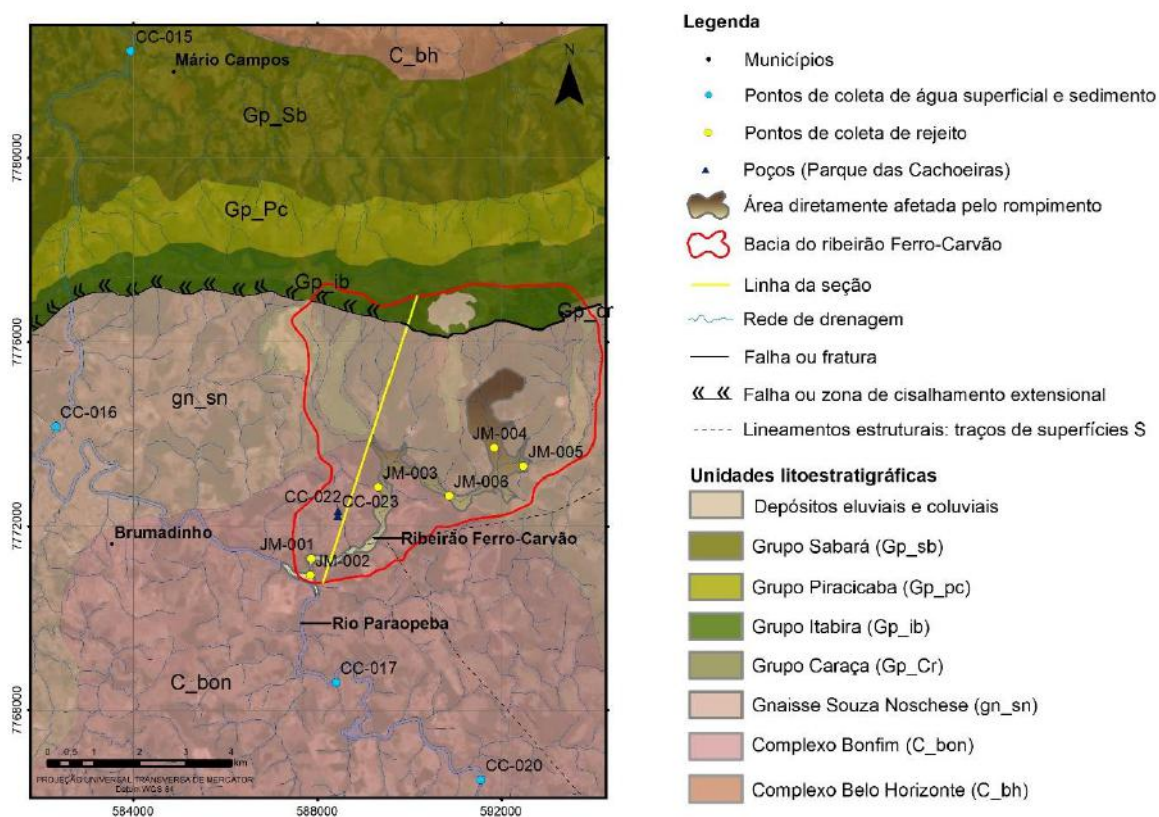


Figura 11 - Mapa geológico simplificado da área de estudo, somente com as unidades litoestratigráficas principais. A linha amarela que indica a seção é referente à Figura 23.

O complexo granito-gnáissico representa a maior parte da área e aflora ao redor da região do Quadrilátero Ferrífero, sendo ao norte da Serra do Curral chamado de Complexo Belo Horizonte e a oeste da Serra da Moeda denominado Complexo Bonfim (UHLEIN & NOCE, 2012).

O Complexo Bonfim faz parte do complexo granito-gnáissico de idade arqueana e consiste em um anel externo de rochas gnáissicas de composição granítica e foliação pouco desenvolvida, que é chamado de Gnaiss Souza Neschese, e um núcleo interno de gnaisses bandados e foliados de composição granodiorítica a tonalítica-trondhjemítica, este último denominado de Granito Alberto Flores (CARNEIRO, 1992).

O Complexo Belo Horizonte, também parte do complexo granito-gnáissico, é formado por gnaisses de composição granodiorítica com bandamento composicional. Segundo Herz (1970) *apud* Noce et al. (1997), as rochas desse complexo são similares às rochas do Complexo Bonfim. De acordo com Noce et al. (1997) a litologia dominante no Complexo Belo Horizonte é um gnaiss cinza claro, de caráter ortoderivado com bandamento composicional e feições de migmatização.

O Supergrupo Minas é composto por rochas de origem sedimentar e é subdividido em 5 grupos da base para o topo: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará (ALKMIN & MARSHAK, 1998). De acordo com Door (1969), as rochas do Supergrupo Minas estão preservadas apenas nas estruturas sinclinais e seu grau metamórfico possui uma variação de fácies xisto verde a fácies anfibolito-almândina, aumentando de sudeste para leste.

Como exposto por Alkmin & Marshak (1998), as unidades basais do Supergrupo Minas são compostas de conglomerados aluviais e arenitos, que gradam para pelitos provenientes de ambiente marinho raso (Grupos Tamanduá e Caraça), seguidas pelo Grupo Itabira, constituído da formação ferrífera bandada (BIF) do tipo lago superior na Formação Cauê e das sequências carbonáticas da Formação Gandarela. Acima do Grupo Itabira está o Grupo Piracicaba que, de acordo com Door (1969), é de origem clástica com conglomerados finos gradando até quartzito, filito e filito grafitoso, com unidades químicas representadas por raras camadas de dolomita e pequenas lentes de formação ferrífera. Segue-se a unidade do topo (Grupo Sabará), que é uma

sequência de turbiditos, tufos, rochas vulcanoclásticas, conglomerados e diamictitos. Essa última está em inconformidade com o Grupo Piracicaba (ALKMIN & MARSHAK, 1998).

3.2.2. Hidrogeologia

3.2.2.1 Sistemas Aquíferos

Em escala regional (mapeamento 1:1.000.000), a região é dividida em dois Sistemas Aquíferos: Fraturado e Poroso (ANA, 2013). Cardoso et al (2012) explicam que Sistemas Fraturados são aqueles em que a água subterrânea está distribuída nos planos de fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas em geral, enquanto os Sistemas Porosos (ou Granulares) são aqueles em que a água subterrânea está nos poros das rochas. O Sistema Fraturado da área de estudo é o Fraturado Centro-Sul e o Sistema Poroso é o Aquífero Cauê, associado a Formação Cauê do Grupo Itabira (unidade litoestratigráfica de origem sedimentar). É válido ressaltar que, mesmo sendo uma unidade metamórfica, a formação Cauê foi definida como parte do Sistema Poroso devido a sua porosidade intersticial e de fraturas, sendo a primeira predominante (CARDOSO et al., 2012).

Segundo Mourão (2007), o Aquífero Cauê é o principal da região e possui poços com altas vazões, por vezes acima de 100 m³/h. Sua porosidade é fissural (fraturada) ou granular, variando bastante entre esses extremos conforme a intensidade do processo supergênico de dissolução de quartzo e carbonato das rochas. A hidroquímica das águas do Aquífero Cauê é bastante diversificada, mas em geral as águas são pouco mineralizadas, com baixa condutividade elétrica (em média 13,2 µS/cm) e pH em torno de 5,96 (MOURÃO, 2007).

Já o Aquífero fraturado centro-Sul (ANA, 2013) equivale, de forma local, aos Aquíferos em rochas granito-gnáissicas citados por Mourão (2007) em sua tese. Esses aquíferos correspondem a aquíferos fraturados que apresentam espesso manto de intemperismo que influencia na recarga através das fraturas na rocha sã e nas restituições para os cursos d'água. As vazões dos poços perfurados nessa unidade variam em torno de 1,5 m³/h em média (BEATO et al. 2005 apud MOURÃO, 2007). A hidrogeoquímica é bastante variável devido aos diferentes teores de cálcio,

magnésio e cloretos, mas de forma geral prevalecem águas bicarbonatadas cálcicas-magnesianas e às vezes com concentrações elevadas de sódio e cloreto. São pouco mineralizadas, com condutividade média de 38,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH em torno de 6,23 (MOURÃO, 2007).



Figura 12 - Mapa hidrogeológico com a representação dos Sistemas Aquíferos aflorantes da área de estudo (fonte: ANA).

3.3 Mineração na região

O Quadrilátero Ferrífero é a província mineral mais importante do sudeste do Brasil e deteve a maior produção de ferro em âmbito nacional, com produção bruta de 406.877.966 t, e a segunda maior produção de ouro com 28,7 t de ouro contido, no ano de 2017 (ANM, 2018).

A história do Quadrilátero Ferrífero é marcada pelo desenvolvimento associado a extração de recursos minerais. Como conta Girodo (2005), a mineração no Quadrilátero Ferrífero vem desde a época do Brasil Colonial, e teve o seu apogeu no chamado Ciclo do Ouro no século XVIII, sendo o grande responsável pelo estabelecimento das cidades históricas de Minas Gerais, como Ouro Preto, Mariana,

Sabará, São João d' El Rei, entre outras. Durante o Século XX foram explorados os mais diversos depósitos minerais como ferro, ouro, manganês, bauxita, e chegou ao Século XXI com o seu grande negócio: o ferro. As mineralizações de ferro na região estão inseridas nas estruturas da Serra do Curral e nos sinclinais da Serra da Moeda e do Gandarela, correspondendo a um enorme volume lavrável, distribuídos por um grande número de empreendimentos mineiros, sendo a Mina Córrego do Feijão um dos empreendimentos de grande porte.

A Barragem I da Mina do Córrego do Feijão (Figura 13), foi construída em 1976 pelo método de alteamento a montante e possuía no momento da ruptura 86 m de altura com crista de 720 m de comprimento (VALE, 2019). De acordo com Girodo (2005) a lavra da jazida era a céu aberto, com bancos de 10 metros de altura. O rejeito ocupava uma área de 249,5 mil m² e o volume disposto era de 11,7 milhões de m³. Em 2005, cerca de $7,4 \times 10^6$ t/ano de hematitas e itabiritos eram lavrados e levados à planta de beneficiamento, produzindo 20% de granulados (LO), 40% de *sinter feed* e 20% de *pellet feed fines*, com um rendimento ponderal de cerca de 80% (GIRODO, 2005). Estes termos são nomes de produtos do beneficiamento do ferro, sendo: granulados os de maior tamanho, que podem ser levados diretamente ao alto forno, possui elevado teor de ferro e baixo teor de contaminantes, sinter feed são partículas de tamanho intermediário que precisam passar por processos antes de ir ao alto forno e pellets são as partículas mais finas que precisam passar pelo processo de pelotização antes de ir ao alto forno.



Figura 13 - Fotografia panorâmica da mina Córrego do Feijão em 2005. No canto inferior direito tem-se a Barragem 1. (Fonte: GIRODO, 2005)

4. CONCEITOS BÁSICOS

Nos itens a seguir serão feitas algumas considerações sobre os assuntos referentes aos temas-base do presente trabalho final de curso, além de sua importância e suas aplicações nesse tipo de estudo. Consiste em uma revisão do estado-da-arte do tema proposto, visando compreender o nexos e o resultado do emprego das técnicas usadas na pesquisa.

4.1 Geoquímica Ambiental

No passado, os estudos na área da geoquímica eram voltados essencialmente para conhecer a distribuição natural dos elementos químicos na terra, em relação ao espaço e ao tempo (MASON, 1971 *apud* MOREIRA-NORDEMANN, 1987). Contudo, com o passar dos anos e como consequência do desenvolvimento das atividades humanas, principalmente no que se refere às indústrias, o meio ambiente passou a ser mais intensamente modificado, com alterações na composição química da atmosfera, hidrosfera e solos. Nesse contexto surgiu a Geoquímica Ambiental, que realiza trabalhos referentes à detecção e controle de poluição, e às modificações decorridas no meio ambiente em consequência de interferências de caráter antrópico (MOREIRA-NORDEMANN, 1987).

A Geoquímica Ambiental está associada ao desenvolvimento sustentável, que por definição significa suprir as necessidades do presente sem afetar a habilidade das gerações futuras de suprirem as próprias necessidades. De acordo com Cordani (1997), o papel das Geociências em uma sociedade que almeja o desenvolvimento sustentável deve ter o monitoramento contínuo dos processos do “Sistema Terra” através do gerenciamento e fornecimento de recursos minerais e energéticos e hídricos e a conservação e o gerenciamento dos solos agrícolas.

4.1.1 *Background* geoquímico

O termo ‘*background* geoquímico’ está originalmente relacionado à exploração mineral, quando amostras geoquímicas eram analisadas com finalidade de diferenciar abundância de elementos em regiões mineralizadas e não-mineralizadas, definindo um valor relativo de *background* e regiões de concentrações anômalas, ou seja:

maiores que o *background* da área. Atualmente, com o aumento da conscientização ambiental e com a crescente demanda de investigação de poluentes na água, ar, solo e sedimento, o estabelecimento de valores de *background* geoquímico vem como uma ferramenta de gestão territorial, para dar uma medida relativa, utilizada para distinguir concentrações naturais (geogênica/biogênica) de um determinado elemento da influência antrópica que possa haver nessas concentrações (MATSCHULLAT et al., 2000). Ou seja, com o valor de *background* definido, todo o valor acima dele deve ser observado com atenção.

Existem diversas definições de *background* geoquímico, mas todas elas se encontram em um ponto em comum: a partir desse valor determinam-se concentrações anômalas de um elemento em um material sob investigação (PLUMLEE, 1999 apud RODRIGUES & NALINI, 2009). Considerando a ampla gama de definições existentes, é importante especificar a definição que será utilizada neste trabalho: “Concentrações de substâncias inorgânicas naturais e de substâncias inorgânicas de origem antrópica que são representativas de uma dada região” (NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL PROTECTION CABINET, 2004 apud RODRIGUES & NALINI, 2009).

Existem dois métodos utilizados na determinação do *background*: direto e indireto. O método direto consiste na obtenção do valor médio de concentrações de elementos em amostras livres de influência antrópica. O método indireto é essencialmente estatístico, sendo regressão linear, análise *fractal*, gráficos de probabilidade normal, método de Lepetier e *boxplots* as principais técnicas utilizadas (RODRIGUES & NALINI, 2009). Neste trabalho utilizou-se o método indireto através do *boxplot* (Figura 14). O *boxplot* é um gráfico que usa como base a frequência acumulada de um determinado elemento. Os valores obtidos dessa frequência, são separados em diferentes quartis (25%, 50% e 75%). Os quartis 25% (1º quartil) e 75% (3º quartil) formam os lados de um retângulo (*box*). O quartil 50% é a mediana e as linhas que se estendem para cima e para baixo até valores extremos ou até os valores 1,5 vezes inferior e superior aos valores das amplitudes interquartis (IQR) 25-50% e 50-75%, respectivamente. Neste caso, resultados acima e abaixo das linhas são considerados valores díspares, conhecidos como *outliers* ou anômalos (Frizzo et al., 2007).

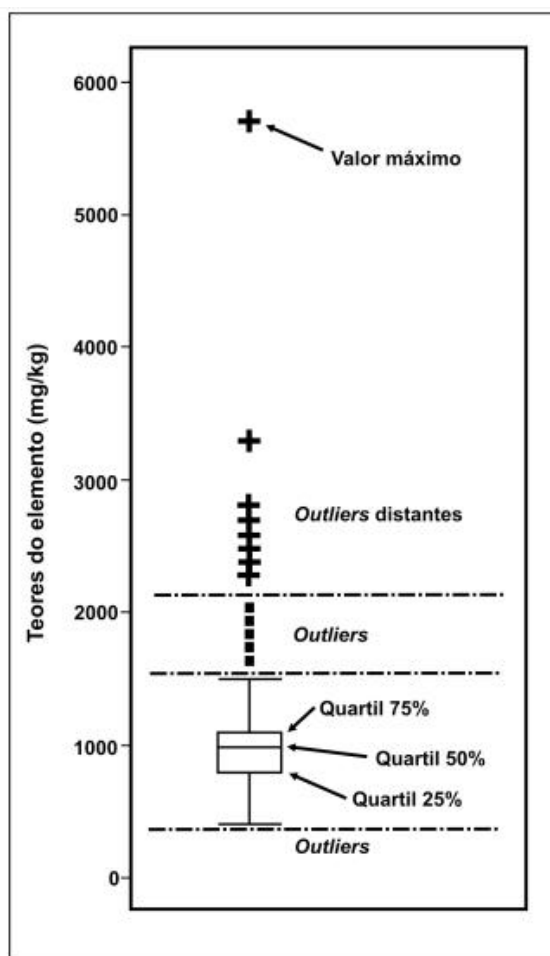


Figura 14 - Representação gráfica do box-plot (RODRIGUES & NALINI, 2009). -

4.1.2 Mobilidade dos elementos

De acordo com Licht (1998), a mobilidade geoquímica de um elemento é a facilidade com que ele se move em um determinado ambiente. Um parâmetro aproximado para a mobilidade em sistemas superficiais (ou supergênicos) é dado pelo potencial iônico (Figura 15). Elementos com baixo potencial iônico tendem a ser solúveis como cátions, enquanto os com potencial iônico muito elevado atraem o oxigênio e formam oxi-ânions solúveis. Elementos de potencial iônico intermediário são imóveis devido à baixa solubilidade e tendência a adsorção.

4.2 Hidrogeoquímica

4.2.1 Parâmetros físico-químicos

Neste item serão descritos, de acordo com Feitosa et al. (2008), os parâmetros físico-químicos abordados nesse estudo, são eles: condutividade elétrica, turbidez, pH, oxigênio dissolvido e alcalinidade.

A condutividade elétrica é a medida da facilidade de uma determinada água em conduzir a corrente elétrica. Normalmente é quantificada em $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo variar de 0,055 (água deionizada) a 55.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (água do mar) ou mais, em águas hipersalinas. Está diretamente associada à quantidade de sais dissolvidos sob a forma de íons. A turbidez é a dificuldade da água para transmitir luz, e é provocada pelos sólidos em suspensão. É quantificada usualmente em NTU e possui em geral uma variação de 0 a 4000 NTU, a depender do medidor. Quando maior a quantidade de sólidos em suspensão, maior será a turbidez da água e vice-versa. O pH representa a concentração de íons H^+ na água (ou solução) e é basicamente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. Varia de 1 a 14, em que 1 é o extremo ácido, 7 é neutro e 14 é o extremo básico. A alcalinidade é a capacidade de uma água neutralizar ácidos. Está diretamente relacionada a presença ou ausência de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. O oxigênio dissolvido é um indicador da concentração de oxigênio dissolvido em água, por exemplo, em mg/L. A solubilidade do oxigênio ocorre em função da temperatura, pressão e dos sais dissolvidos na solução.

4.2.2 Constituintes iônicos principais, secundários, traços, tóxicos e carcinógenos

De acordo com Santos (2008) os constituintes iônicos principais estão presentes na maioria das águas subterrâneas e sua soma representa quase a totalidade da massa dos íons: sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), ferro (Fe^{+2}), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{-2}), cloreto (Cl^-), nitrato (NO_3^-), silício (Si) e sulfato (SO_4^{-2}).

Constituintes iônicos secundários normalmente aparecem em circunstâncias especiais, como em locais próximos a áreas de mineração, com condições geológicas

menos comuns e em locais próximos a focos de contaminação. Alguns exemplos são, dentre outros, os seguintes elementos: boro (B^{+3}), brometo (Br^-), manganês (Mn), estrôncio (Sr) e zinco (Zn^{+2}).

Os constituintes-traço são aqueles que aparecem geralmente em concentrações totais inferiores a 1% dos constituintes principais e secundários.

Os constituintes iônicos tóxicos e carcinogênicos nas águas naturais são aqueles que podem gerar doenças quando há ingestão contínua de água com excesso dessas substâncias. São eles (dentre outros): antimônio (Sb), arsênio (As), bário (Ba^{+2}), cádmio (Cd^{+2}), chumbo (Pb), cobre (Cu^+), cromo (Cr), fluoreto (F^-), mercúrio (Hg), selênio (Se).

4.2.3 Diagrama de Piper

O diagrama de Piper é utilizado para classificar e comparar diferentes grupos de água em relação aos íons dominantes. A representação gráfica pode evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra, ou ressaltar variações temporais ou espaciais existentes. O *software* utilizado para a elaboração dos diagramas no presente trabalho de conclusão de curso foi o Qualigraph.

4.3 Estimativa da contribuição dos aquíferos à vazão de rios: balanço hidrometeorológico pelo método Thornthwaite

O balanço hidrometeorológico foi proposto por Thornthwaite & Mather (1995) com o objetivo de caracterizar o regime hídrico de um determinado sistema sem medições diretas das características do solo. Para isso, deve-se utilizar um valor de armazenamento máximo do solo ou CAD (capacidade de água disponível), valores da precipitação, temperatura e estimativa da evapotranspiração por período. A partir disso os cálculos do balanço hídrico são feitos e pode-se deduzir informações sobre evapotranspiração real, déficit hídrico, excedente e o total de água retida no solo.

Neste trabalho os cálculos foram feitos utilizando a planilha de Rolim & Sentelhas (1998) e utilizou-se o intervalo de tempo de 5 anos com dados históricos do INMET

na Estação meteorológica Ibirité – Rola Moça, localizada a aproximadamente 14 km da Barragem I. O valor escolhido para a CAD (capacidade de água disponível) foi 100, com base nos valores sugeridos no site da SISDAGRO, o Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária do INMET, visto que a maior parte da bacia é coberta por cambissolos (CPRM, 2010), ou seja, solos majoritariamente argilosos.

A partir dos valores de excedente hídrico obtidos no balanço, pode-se fazer uma estimativa da contribuição dos aquíferos à vazão dos rios. Essa estimativa é feita multiplicando-se a soma do excedente anual pela área da bacia, e o resultado é uma vazão em L/s.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados analíticos e interpretações referentes aos materiais coletados nas estações de amostragem exibidas na figura 3.

5.1 Material resultante do rompimento (rejeito)

De acordo com o trabalho de caracterização do rejeito desenvolvido por Gomes (2009) a composição global do rejeito original armazenado na Barragem I, em termos mineralógicos, era constituída majoritariamente por hematita granular (Fe_2O_3), martita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), quartzo (SiO_2) e magnetita (Fe_3O_4).

O material depositado após o rompimento da barragem é uma mistura do rejeito original descrito por Gomes (2009) com todo o material que estava pelo caminho, ou seja, é bastante heterogêneo (Figura 16). De acordo com a norma ABNT NBR-10004, que dispõe sobre a classificação de resíduos sólidos, ele está classificado como classe II-A (resíduos não perigosos e não inertes).

Neste trabalho esse material misturado será chamado de rejeito, porém de forma generalizada somente para facilitar o entendimento. É importante lembrar que o rejeito original é o que estava armazenado na barragem antes do rompimento e que o rejeito analisado neste trabalho é o resultado da mistura anteriormente citada.



Figura 16 - Rejeito depositado no ribeirão Ferro-Carvão (reprodução própria).

As seis amostras coletadas do material depositado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão foram analisadas e os resultados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do material resultante do rompimento ("rejeito").

Resultados da análise do rejeito							
Elementos	JM-001	JM-002	JM-003	JM-004	JM-005	JM-006	MÉDIA
Ag (ppm)	I.N.F.	I.N.F.	I.N.F.	I.N.F.	I.N.F.	I.N.F.	I.N.F.
Al (%)	1.73	1.25	1.77	0.74	0.77	1.48	1.29
As (ppm)	18	16	19	11	9	20	15.5
Au (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
B (ppm)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ba (ppm)	180.00	158.00	161.00	122.00	89.00	174.00	147.33
Be (ppm)	2.20	1.90	2.10	1.40	1.20	2.30	1.85
Bi (ppm)	0.28	0.24	0.28	0.18	0.15	0.26	0.23
Ca (%)	0.21	0.04	0.05	0.02	0.02	0.04	0.06
Cd (ppm)	0.49	0.39	0.42	0.22	0.16	0.51	0.37
Ce (ppm)	26.62	21.26	30.08	12.07	12.97	22.85	20.98
Co (ppm)	33.50	29.90	29.60	20.80	15.50	35.80	27.52
Cr (ppm)	12	9	11	<1	<1	10	7.17
Cs (ppm)	0.5	0.32	0.57	0.11	0.26	0.29	0.34
Cu (ppm)	101.2	87.1	90.4	45.9	28.2	105.2	76.33
Fe (%)	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15
Fe ₂ O ₃ (%)	63.6	67.8	58.3	80.5	72.8	69.1	68.68
Ga (ppm)	7.70	6.20	8.10	4.00	4.00	7.50	6.25
Ge (ppm)	1.10	1.10	1.00	1.30	1.20	1.10	1.13
Hf (ppm)	0.33	0.26	0.20	0.27	0.23	0.36	0.28
Hg (ppm)	0.19	0.15	0.15	0.12	0.06	0.14	0.14
In (ppm)	0.08	0.07	0.07	0.05	0.04	0.08	0.07
K (%)	0.05	0.03	0.05	0.01	0.03	0.03	0.03
La (ppm)	7.90	6.20	8.80	3.70	4.50	6.70	6.30
Li (ppm)	19.00	15.00	15.00	8.00	6.00	17.00	13.33
Lu (ppm)	0.51	0.42	0.47	0.25	0.19	0.54	0.40
Mg (%)	0.09	0.06	0.07	0.04	0.04	0.07	0.06
Mn (ppm)	>10000	9661	>10000	6831	4084	>10000	9679.33
MnO (%)	1.63	N.A.	1.47	N.A.	N.A.	1.65	1.58
Mo (ppm)	3.24	1.56	1.79	1.13	0.97	1.85	1.76
Na (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Nb (ppm)	1.15	1.05	1.47	0.77	0.83	1.14	1.07
Ni (ppm)	26.00	23.60	22.60	11.60	3.40	26.40	18.93
P (ppm)	1010.00	886.00	986.00	652.00	446.00	1058.00	839.67
Pb (ppm)	32.50	25.20	26.50	16.40	13.40	29.20	23.87
Rb (ppm)	5.40	3.20	5.80	1.00	2.60	2.90	3.48
Re (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
S (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Sb (ppm)	1.03	0.91	0.95	0.86	0.70	1.05	0.92
Sc (ppm)	8.40	7.20	8.50	5.70	4.70	10.30	7.47
Se (ppm)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<2
Sn (ppm)	1.50	1.20	1.80	0.70	0.80	1.40	1.23
Sr (ppm)	38.70	28.80	28.20	19.90	13.30	31.50	26.73
Ta (ppm)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.06
Tb (ppm)	0.51	0.41	0.51	0.25	0.23	0.43	0.39
Te (ppm)	0.08	0.08	0.08	<0.05	<0.05	0.08	0.08
Th (ppm)	6.40	4.10	5.10	2.40	2.40	3.60	4.00
Ti (%)	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03
Tl (ppm)	0.35	0.31	0.33	0.26	0.22	0.34	0.30
U (ppm)	10.83	9.75	10.14	7.01	6.22	11.69	9.27
V (ppm)	23.00	18.00	23.00	12.00	11.00	20.00	17.83
W (ppm)	1.30	1.00	1.00	1.20	0.90	1.20	1.10
Y (ppm)	23.23	19.57	22.94	11.50	9.50	23.61	18.39
Yb (ppm)	3.10	2.60	2.90	1.50	1.20	3.10	2.40
Zn (ppm)	81.00	69.00	74.00	50.00	37.00	82.00	65.50
Zr (ppm)	19.60	18.70	16.70	17.90	16.30	21.80	18.50

* Fe (%) e Mn (ppm) não foram quantificados total ou parcialmente no ICP-OES / ICP-MS devido a alta concentração. Para uma melhor análise eles, em forma de óxido, foram adicionalmente quantificados por XRF.

I.N.F = Não reportado devido a interferentes
N.A. = Não analisado

Dos 56 elementos analisados, sete não foram detectados (Ag, Au, B, Na, Re, Se e Ta) e dois ultrapassaram os limites máximos de quantificação do ICP-MS (Fe e Mn).

Para o melhor entendimento de quais são os elementos dominantes e sua influência no meio, o item a seguir irá expor uma comparação da média dos teores das seis estações (JM-001, JM-002, JM-003, JM-004, JM-005 e JM-006) e coleta do rejeito com o sedimento coletado no rio Paraopeba a montante e a jusante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão.

5.2 Sedimento de fundo

Os resultados analíticos das quatro estações de coleta de sedimento de fundo (CC-020, CC-017, CC-016 e CC-015) do rio Paraopeba, obtidos nas duas etapas de campo (fevereiro e julho), estão expostos nas tabelas 2 e 3.

Dos 56 elementos analisados, cinco (Au, B, Na, Re e Se) não foram detectados nas amostras de fevereiro/2019 e oito (Au, B, Hf, Na, Re, Se, Ta, Te) nas amostras de julho/2019. Além disso, Fe e Mn ultrapassaram os limites máximos de quantificação do ICP-MS em algumas amostras.

Com base nos resultados das amostras coletadas no mês de fevereiro/2019, foram elaborados gráficos comparativos entre as estações CC-020, CC-017, CC-016 e CC-015 com a média do rejeito, elemento por elemento (detectados), para identificar quais elementos são mais prováveis de estarem diretamente associados ao rejeito. Todos os gráficos elaborados estão dispostos no apêndice A.

Os elementos Cd, Cu, Fe, Ge, Hg, Mn, P, Sr, U, W e Zr, foram encontrados em valores mais elevados no rejeito e nas estações a jusante (JM-média, CC-016 e CC-015) da confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, enquanto nas estações a montante (CC-020 e CC-017), no rio Paraopeba, possuem concentrações expressivamente menores (Figura 17). Com isso, pode-se dizer que esses elementos possuem uma associação mais forte com o rejeito e sinalizam a sua influência nos demais meios de amostragem.

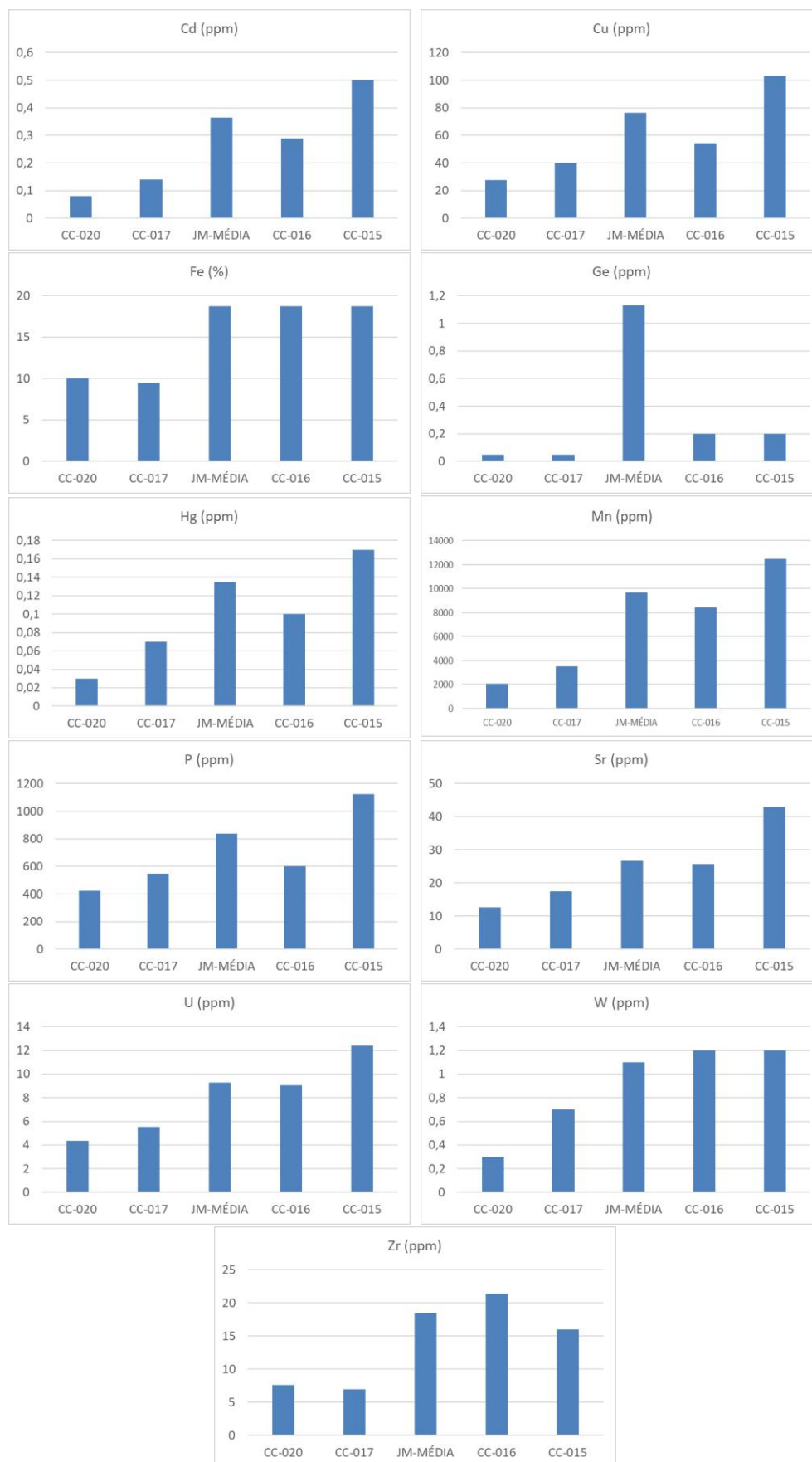


Figura 17 - Possíveis elementos indicadores da presença de rejeito.

Tabela 2 - Resultados analíticos de sedimento de fundo da Campanha 2 (fev/2019).

Análise de Sedimento de Fundo - Fevereiro						
Elementos	CC-020	CC-017	JM-MÉDIA	CC-016	CC-015	CONAMA 454 Nível 1
Ag (ppm)	<0.01	<0.01	I.N.F.	<0.01	1.33	
Al (%)	2.23	3.12	1.29	1.44	2.24	
As (ppm)	13	18	15.50	12	16	5.9
Au (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
B (ppm)	<10	<10	<10	<10	<10	
Ba (ppm)	117	153	147.33	169	220	
Be (ppm)	1.1	1.5	1.85	1.4	2	
Bi (ppm)	0.38	0.59	0.23	0.33	0.41	
Ca (%)	0.09	0.15	0.06	0.05	0.06	
Cd (ppm)	0.08	0.14	0.37	0.29	0.5	0.6
Ce (ppm)	63.48	85.02	20.98	27.91	35.78	
Co (ppm)	19.5	23.9	27.52	21.4	30	
Cr (ppm)	71	94	7.17	42	20	37.3
Cs (ppm)	2.2	2.87	0.34	0.98	1.04	
Cu (ppm)	27.6	40.1	76.33	54.3	103.1	
Fe (%)	10.02	9.52	> LQ máx	>15	>15	
Ga (ppm)	11.5	15.8	6.25	6	8.4	
Ge (ppm)	<0.1	<0.1	1.13	0.2	0.2	
Hf (ppm)	0.06	0.15	0.28	0.08	0.14	
Hg (ppm)	0.03	0.07	0.14	0.1	0.17	0.17
In (ppm)	0.04	0.07	0.07	0.07	0.1	
K (%)	0.13	0.14	0.03	0.06	0.1	
La (ppm)	22	27.4	6.30	9.4	12.1	
Li (ppm)	8	10	13.33	13	24	
Lu (ppm)	0.18	0.29	0.40	0.32	0.53	
Mg (%)	0.16	0.18	0.06	0.08	0.1	
Mn (ppm)	2049	3516	9679.33	8433	>10000	
Mo (ppm)	0.82	1.24	1.76	1.5	2.07	
Na (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Nb (ppm)	1.1	1.88	1.07	1.15	1.29	
Ni (ppm)	24.1	29.6	18.93	37.9	31.6	18
P (ppm)	425	548	839.67	602	1125	
Pb (ppm)	21.2	30.3	23.87	25.3	37.6	35
Rb (ppm)	24.9	29.3	3.48	11.3	12.3	
Re (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
S (%)	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	
Sb (ppm)	2.09	3.01	0.92	1.27	1.38	
Sc (ppm)	10.1	12.7	7.47	4.8	6.8	
Se (ppm)	<1	<1	<2	<1	<1	
Sn (ppm)	1.9	3	1.23	1.5	2.3	
Sr (ppm)	12.6	17.5	26.73	25.7	43	
Ta (ppm)	<0.05	0.1	<0.06	<0.05	<0.05	
Tb (ppm)	0.47	0.65	0.39	0.38	0.55	
Te (ppm)	<0.05	0.13	0.08	0.06	0.06	
Th (ppm)	12.1	14	4.00	5.2	6.8	
Ti (%)	0.05	0.06	0.03	0.03	0.04	
Tl (ppm)	0.32	0.78	0.30	0.46	0.53	
U (ppm)	4.35	5.52	9.27	9.07	12.39	
V (ppm)	63	96	17.83	14	30	
W (ppm)	0.3	0.7	1.10	1.2	1.2	
Y (ppm)	14.43	21.15	18.39	20.05	31.14	
Yb (ppm)	1.3	1.9	2.40	2	3.3	
Zn (ppm)	53	80	65.50	53	85	123
Zr (ppm)	7.6	7	18.5	21.4	16	

Tabela 3 - Resultados analíticos de sedimento de fundo da Campanha 4 (jul/2019).

Análise de Sedimento de Fundo - Julho						CONAMA 454	CONAMA 454
Elementos	CC-020	CC-017	JM-MÉDIA	CC-016	CC-015	Nível 1	Nível 2
Ag (ppm)	0.15	0.24	I.N.F.	0.44	0.64		
Al (%)	2.35	3.21	1.29	0.85	1.45		
As (ppm)	12	15	15.50	8	12	5.9	17
Au (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
B (ppm)	<10	<10	<10	<10	<10		
Ba (ppm)	121	161	147.33	122	158		
Be (ppm)	1	1.3	1.85	1	1.5		
Bi (ppm)	0.26	0.43	0.23	0.2	0.28		
Ca (%)	0.09	0.15	0.06	0.03	0.05		
Cd (ppm)	0.11	0.11	0.37	0.18	0.29	0.6	3.5
Ce (ppm)	50.5	64.17	20.98	13.86	28.51		
Co (ppm)	16.5	23.5	27.52	16	21.1		
Cr (ppm)	67	89	7.17	20	31	37.3	90
Cs (ppm)	1.72	2.31	0.34	0.47	0.59		
Cu (ppm)	28.6	40.8	76.33	39.5	73.3		
Fe (%)	10.98	10.07	> LQ máx	>15	>15		
Ga (ppm)	10.2	13.7	6.25	3.4	5.5		
Ge (ppm)	<0.1	<0.1	1.13	0.4	0.6		
Hf (ppm)	<0.05	<0.05	0.28	<0.05	<0.05		
Hg (ppm)	<0.01	<0.01	0.14	<0.01	0.02	0.17	0.486
In (ppm)	0.04	0.05	0.07	0.04	0.06		
K (%)	0.12	0.14	0.03	0.03	0.05		
La (ppm)	17.8	24.4	6.30	5.4	12.4		
Li (ppm)	9	11	13.33	9	14		
Lu (ppm)	0.14	0.18	0.40	0.16	0.27		
Mg (%)	0.15	0.19	0.06	0.06	0.08		
Mn (ppm)	2510	3519	9679.33	6477	9874		
Mo (ppm)	0.99	1.15	1.76	1.23	1.64		
Na (%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
Nb (ppm)	1.13	1.34	1.07	0.87	1.39		
Ni (ppm)	21.8	27.3	18.93	25.4	34.6	18	35.9
P (ppm)	430	588	839.67	565	878		
Pb (ppm)	19.6	24	23.87	15.3	21.9	35	91.3
Rb (ppm)	19.3	24	3.48	5	7.2		
Re (ppm)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
S (%)	0.02	0.03	<0.01	<0.01	0.01		
Sb (ppm)	2.33	2.13	0.92	1	1.2		
Sc (ppm)	9.6	12.3	7.47	3.7	5.5		
Se (ppm)	<1	<1	<2	<1	<1		
Sn (ppm)	2	2.6	1.23	0.9	1.6		
Sr (ppm)	11.9	18	26.73	18.6	27.6		
Ta (ppm)	<0.05	<0.05	<0.06	<0.05	<0.05		
Tb (ppm)	0.33	0.44	0.39	0.16	0.31		
Te (ppm)	<0.05	<0.05	0.08	<0.05	0.06		
Th (ppm)	9.8	10.8	4.00	2.9	7.3		
Ti (%)	0.04	0.05	0.03	0.01	0.02		
Tl (ppm)	0.27	0.33	0.30	0.21	0.28		
U (ppm)	3.09	3.96	9.27	5.38	7.05		
V (ppm)	71	105	17.83	22	29		
W (ppm)	0.3	0.3	1.10	0.8	0.9		
Y (ppm)	12.36	16.43	18.39	11.21	19.23		
Yb (ppm)	1	1.3	2.40	1	1.7		
Zn (ppm)	55	72	65.50	33	53	123	315
Zr (ppm)	3.9	3.8	18.5	7.2	8		

Nas tabelas 2 e 3 apresentadas, os valores em azul representam os elementos que ultrapassaram o valor máximo permitido (VMP) definido pela CONAMA 454 –

Nível 1 e os em vermelho representam os que ultrapassaram o valor definido pela CONAMA 454 – Nível 2. Nota-se que, comparativamente aos resultados de fevereiro/2019, os de julho/2019 não apresentam nenhuma violação à CONAMA 454 – Nível 2.

Do ponto de vista da legislação ambiental, das 216 análises de sedimento de fundo (CC-020, CC-017, CC-016 e CC-015) das amostras de fevereiro (Tabela 2), 13 (6,02%) encontram-se acima dos valores máximos permitidos (VMP) pela CONAMA 454 para os seguintes elementos: As, Cr, Ni, Hg e Pb. Nas amostras de julho/2019 (Tabela 3) o número de amostras que ultrapassaram os VMP da CONAMA 454 caiu para 10 (somente para As, Cr e Ni), ou seja 4,63% do total de análises.

O arsênio (As) está presente em todas as amostras em quantidades similares, sendo difícil afirmar uma relação exclusiva com o rejeito. Seus teores elevados provavelmente possuem outras origens, talvez naturais ou ligadas à mineração de ouro (GONÇALVES et al., 2006). O mesmo raciocínio se aplica ao níquel (Ni). O cromo (Cr) apresenta valores muito mais elevados nas estações a montante do ocorrido. O mercúrio (Hg) foi detectado em apenas uma amostra na estação mais a jusante e exatamente no limite do nível 1 da CONAMA 454 na campanha de fevereiro/2019 e não ultrapassou o VMP da legislação na campanha de julho/2019. O mesmo se aplica ao chumbo (Pb).

5.3 Água superficial

No que diz respeito às análises de água superficial que foram obtidas nas duas etapas de campo (fevereiro e julho de 2019), os valores resultantes estão expostos nas tabelas 4 e 5. Dos 35 elementos analisados, 16 (As, B, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti e Zn) não foram detectados nas amostras de fevereiro/2019. Em virtude disso e devido a alguns imprevistos que ocorreram ao longo das análises, as amostras de julho/2019 foram analisadas para 11 elementos (Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr e Zn) e possuem todos resultados acima do limite de detecção do método em todas as amostras. Os resultados analíticos foram divididos em 4 grupos para facilitar a leitura dos dados.

Tabela 4 - Resultados analíticos de água superficial da Campanha 2 (fev/2019).
 ND = não detectado; <LQ menor que limite de quantificação.

Análise de Água Superficial (Fevereiro)							
	Elementos	CC-020	CC-017	JM-001	CC-016	CC-015	CONAMA 357 - Classe 2
Grupo 1 Elementos regulados pela CONAMA 357	Al (mg/L)	0.1408	0.1792	ND	0.0774	0.0832	0.1
	B (mg/L)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0.5
	Ba (mg/L)	0.0198	0.0219	<LQ	<LQ	<LQ	0.7
	Co (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
	Cr (mg/L)	ND	ND	ND	<LQ	<LQ	0.05
	Cu (mg/L)	<LQ	<LQ	ND	<LQ	<LQ	0.009
	Fe (mg/L)	0.4234	0.4528	X	0.1953	0.2151	0.3
	Li (mg/L)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2.5
	Mn (mg/L)	0.0231	0.0558	0.4166	0.0802	0.0354	0.1
	Ni (mg/L)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0.025
	V (mg/L)	<LQ	<LQ	0.005	<LQ	<LQ	0.1
	Zn (mg/L)	<LQ	<LQ	ND	<LQ	<LQ	0.18
	As (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.01
	Be (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.04
	Cd (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	0.001
	Pb (mg/L)	<LQ	<LQ	ND	<LQ	<LQ	0.01
	Sb (mg/L)	ND	ND	<LQ	ND	ND	0.005
	Se (mg/L)	ND	ND	ND	<LQ	ND	0.01
	Hg (ppm)_filtrada	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	
	Hg (ppm)_bruta	< 0.0005	< 0.0005	0.0014	< 0.0005	< 0.0005	0.0002
Grupo 2 Cátions principais	Ca (mg/L)	4.2265	3.9164	11.167	3.0054	2.9499	
	K (mg/L)	2.3204	2.323	2.2328	2.0451	1.9824	
	Mg (mg/L)	1.4752	1.4903	3.7098	1.0851	1.0581	
	Na (mg/L)	4.7881	4.7270	1.7625	3.6383	3.4657	
Grupo 3	Si (mg/L)	5.492	5.648	1.252	5.062	5.020	
	Sr (mg/L)	0.0452	0.0433	0.0387	0.0312	0.0314	
	Ti (mg/L)	<LQ	<LQ	ND	<LQ	<LQ	
	Mo (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	
	Sn (mg/L)	<LQ	<LQ	ND	ND	<LQ	
Grupo 4 Ânions	F- (mg/L)	0.0989	0.0874	<LQ	0.0645	0.0613	1.4
	Cl- (mg/L)	2.8761	2.5922	1.4551	2.1827	2.0724	250
	NO2- (mg/L)	0.0714	0.0336	0.0972	<LQ	<LQ	1
	Br- (mg/L)	0.0275	0.0290	0.1076	0.0249	0.0222	
	NO3- (mg/L)	2.6918	2.6853	0.9654	1.8353	2.0221	10
	SO42- (mg/L)	4.0827	3.8602	ND	3.4041	2.9637	250
	PO43- (mg/L)	0.0273	0.0243	0.0923	0.6409	ND	

Tabela 5 - Resultados analíticos de água superficial da Campanha 4 (julho/2019).
NA = não analisado.

Análise de Água Superficial (Julho)							
	Elementos	CC-020	CC-017	JM-001	CC-016	CC-015	CONAMA 357 - Classe 2
Grupo 1 Elementos regulados pela CONAMA 357	Al (mg/L)	0.070	0.050	0.043	0.040	0.041	0.1
	B (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.5
	Ba (mg/L)	0.033	0.036	<0.010	0.033	0.053	0.7
	Co (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.05
	Cr (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.05
	Cu (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.009
	Fe (mg/L)	0.332	0.172	0.038	0.100	0.149	0.3
	Li (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	2.5
	Mn (mg/L)	0.015	0.034	0.363	0.063	0.069	0.1
	Ni (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.025
	V (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.1
	Zn (mg/L)	0.075	0.064	0.067	0.047	0.527	0.18
	As (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.01
	Be (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.04
	Cd (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.001
	Pb (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.01
	Sb (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.005
	Se (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	0.01
	Hg (ppm)_filtrada	NA	NA	NA	NA	NA	
	Hg (ppm)_bruta	NA	NA	NA	NA	NA	0.0002
Grupo 2 Cátions principais	Ca (mg/L)	16.475	17.062	23.818	16.362	16.805	
	K (mg/L)	1.996	1.989	1.965	1.989	2.062	
	Mg (mg/L)	2.899	2.980	3.201	2.911	2.997	
	Na (mg/L)	8.831	9.516	3.252	9.428	10.643	
Grupo 3	Si (mg/L)	12.054	11.988	7.910	11.910	10.988	
	Sr (mg/L)	0.069	0.072	0.044	0.069	0.070	
	Ti (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	
	Mo (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	
	Sn (mg/L)	NA	NA	NA	NA	NA	
Grupo 4 Ânions	F- (mg/L)	0.13	0.14	0.06	0.13	0.16	1.4
	Cl- (mg/L)	5.04	5.53	1.45	5.42	6.37	250
	NO2- (mg/L)	0.03	0.02	0.25	0.03	0.05	1
	Br- (mg/L)	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	
	NO3- (mg/L)	6.26	6.2	2.92	6.02	6.47	10
	SO42- (mg/L)	6.4	8.11	9.89	8.19	8.55	250
	PO43- (mg/L)	<LQ	0.22	<LQ	<LQ	<LQ	

Nas tabelas 4 e 5, os valores em vermelho representam os valores que ultrapassaram os valores definidos pela CONAMA 357.

Do ponto de vista da legislação ambiental, os resultados de fevereiro/2019 (Tabela 4) tiveram somente seis de 180 análises (3,33%) com valores acima do VMP estabelecido pela CONAMA 357 para águas superficiais de rio Classe 2. É válido ressaltar que quatro dessas seis amostras foram coletadas à montante do ocorrido, ou seja, não foram influenciadas pelo rejeito. As outras duas análises que violam a legislação são do próprio ribeirão Ferro-Carvão (estação JM-001). Nos resultados de julho/2019 (tabela 5), somente três de 90 análises (3,33%) apresentaram valores acima do estabelecido pela CONAMA 357. É importante destacar que em todas as análises, com exceção do mercúrio bruto, os elementos encontram-se na forma dissolvida pois a água é filtrada antes de ser enviada para o laboratório.

Dos elementos destacados como possíveis indicadores da influência do rejeito, somente Fe, Mn, Hg e Sr obtiveram resultados em água superficial. Os elementos Cd e Cu não foram detectados na amostra de fevereiro e não foram analisados nas amostras de julho. Os elementos Ge, P, U, W e Zr não fazem parte da rotina de análises para água superficial, não sendo possível fazer uma correlação com eles.

O ferro (Fe) encontra-se dissolvido em maior quantidade nas amostras a montante do evento (Figura 18). A comparação de fevereiro (mês chuvoso) com julho (mês seco) de 2019 mostra que em todas as amostras a concentração de ferro dissolvido é superior no mês chuvoso, o que é devido, possivelmente, à maior quantidade material lixiviado para o rio durante os períodos de chuva.

É importante salientar que a amostra JM-001 teve problemas técnicos durante a análise da primeira amostragem (fevereiro/2019), por isso não possui resultados na tabela. Já na amostragem de julho de 2019 o ferro apresenta quantidade muito baixa (0,0387 mg/L), se comparada aos valores medidos anteriormente no projeto APA Sul RMBH (ver item 5.5), e algumas possíveis explicações para isso pode ser que o ferro estava predominantemente na forma particulada, pois uma quantidade muito grande de ferro chegou ao rio de forma repentina e pode ter ultrapassado o coeficiente de solubilidade, gerando a precipitação da maior parte do ferro, e/ou que a água não estava com o pH e outras condições químicas adequadas para ocorrer a sua dissolução em maior quantidade. Em geral, para que ocorra a dissolução do ferro o pH deve ser ácido. Um outro fator importante para a dissolução do ferro é o Eh (potencial de oxirredução), mas este parâmetro não foi medido em campo.

Licht (1998) diz que, como o ferro é um elemento de transição com orbitais eletrônicos internos incompletos, tende a ser menos solúvel e mais fortemente adsorvido. Além disso em condições de pH 5~8 ele é muito pouco móvel, permanecendo na forma particulada, sob forma de hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), praticamente insolúvel.

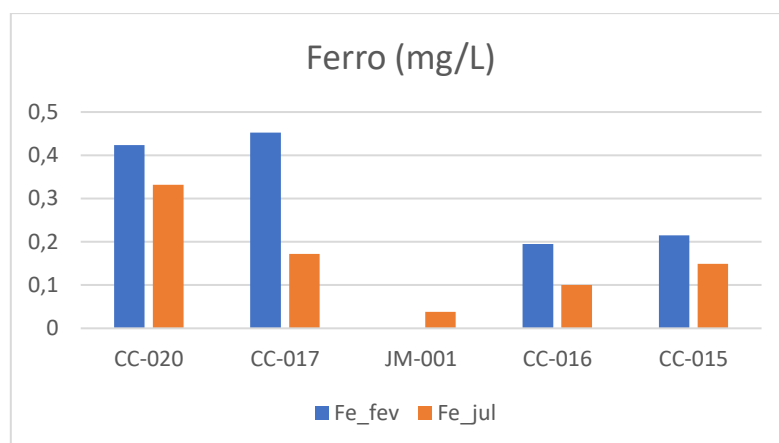


Figura 18 - Concentração de ferro das amostras nos meses de fevereiro e julho de 2019.

O manganês (Mn) aparece dissolvido em quantidades muito maiores na amostra coletada no ribeirão Ferro-Carvão do que as amostras à montante e à jusante, sendo essas últimas com concentrações levemente superiores do que as amostras à montante em ambos meses amostrados. Em geral segue o mesmo padrão do ferro, com maiores concentrações no mês chuvoso (Figura 19).

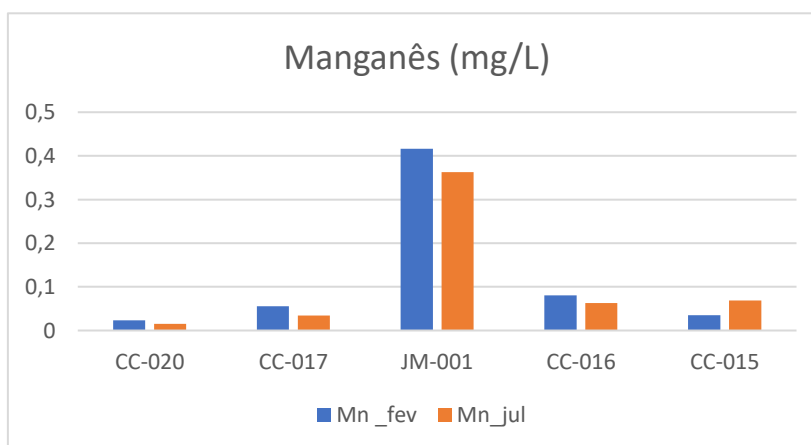


Figura 19 - Concentração de manganês das amostras em fevereiro e julho.

O mercúrio (Hg) aparece somente na forma bruta e apenas no ribeirão Ferro-Carvão, em quantidade muito próximas ao limite de detecção do método. Ele não foi encontrado na amostra filtrada, ou seja, não está presente dissolvido na água.

O estrôncio (Sr), apesar de estar classificado como um dos elementos característicos da presença de rejeito, apresenta concentrações similares em todas as amostras, com maiores concentrações no mês seco (Figura 20).

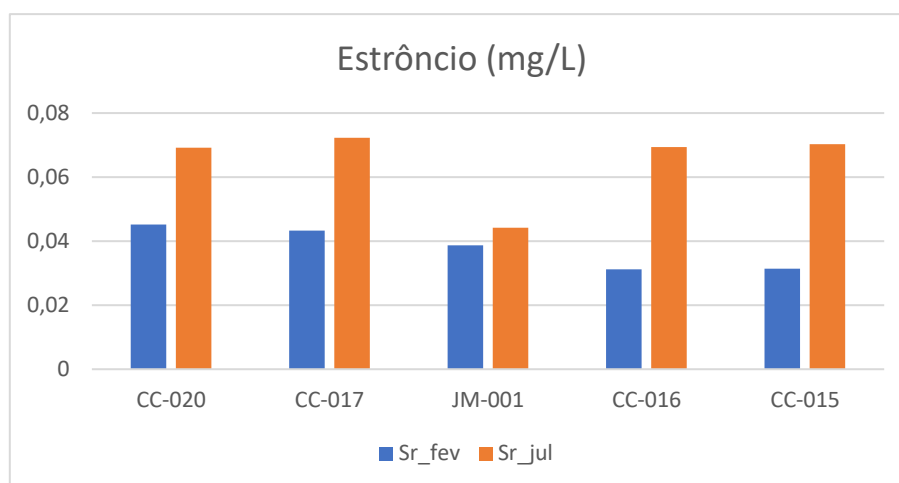


Figura 20 - Concentração de estrôncio nas amostras em fevereiro e julho de 2019.

No que diz respeito aos parâmetros físico-químicos, a tabela 6 exibe os resultados medidos *in loco* das amostras de fevereiro e julho de 2019. Pode-se observar que o pH ficou, de forma geral, estável, variando de neutro a levemente ácido. A condutividade elétrica nas amostras à montante e à jusante do ribeirão Ferro-Carvão teve um aumento, enquanto no ribeirão Ferro-Carvão caiu bastante de fevereiro para julho de 2019. Os valores de oxigênio dissolvido (OD) de julho não foram aproveitados devido a problemas na sonda que mede esse parâmetro.

Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos medidos no local para as campanhas de fevereiro e julho de 2019.

Parâmetros Físico - Químicos								
	pH		condutividade (µS/cm)		OD (mg/L)		temperatura (°C)	
	Fevereiro	Julho	Fevereiro	Julho	Fevereiro	Julho	Fevereiro	Julho
CC-A-020	7,02	7,2	75,19	86,8	10,21	-	23,1	16,4
CC-A-017	7,46	7,12	75,7	92,2	10,26	-	22,8	17,8
JM-A-001	6,5	6,58	140,4	79,65	8,06	-	27,3	25,7
CC-A-016	6,9	6,94	58,3	91,4	9,15	-	26,9	19,5
CC-A-015	6,87	7,39	59,1	98,99	9,73	-	25	20

De acordo com o exposto por Guilherme et al. (2005), a concentração de elementos-traço em sistemas aquáticos superficiais é um resultado da geoquímica das rochas e solos presentes na bacia hidrográfica, poluição e reações químicas como a adsorção em partículas ou outras superfícies e a deposição nos sedimentos.

No caso do presente trabalho, os três fatores influenciam a presença dos referidos elementos, pois eles já estão presentes naturalmente devido a geoquímica das rochas e solos da bacia, mas sofreram um incremento com a presença do rejeito e das reações químicas que sucederam.

5.4 Água subterrânea

5.4.1 Análises Químicas

A tabela 7 resume os resultados obtidos para a análise química e físico-química da água subterrânea dos poços de Parque das Cachoeiras. Não foi observado nenhum valor acima do VMP da resolução CONAMA 396 e poucos elementos foram efetivamente detectados (Al, Ba, Li, Zn, Ca, Na, Mg, K). Nenhum dos elementos de atenção relacionados ao rejeito foi detectado nessas amostras. Esse é um resultado importante, pois essas amostras foram coletadas 6 meses após o ocorrido e estavam localizadas numa área próxima de onde estava depositado o rejeito, indicando que em princípio não houve influência na água subterrânea da região.

De acordo com o diagrama de Piper (Figura 21) as águas foram classificadas como bicarbonatada-sódica (CC-022) e cloretada-sódica (CC-023). Essa classificação, juntamente com a condutividade elétrica e o pH dessas amostras, vão de encontro com o descrito por Mourão (2007) para a hidroquímica dos aquíferos em rochas granito-gnáissicas (ou Fraturado Centro-Sul (ANA, 2013)), que é o aquífero em que os poços estão instalados.

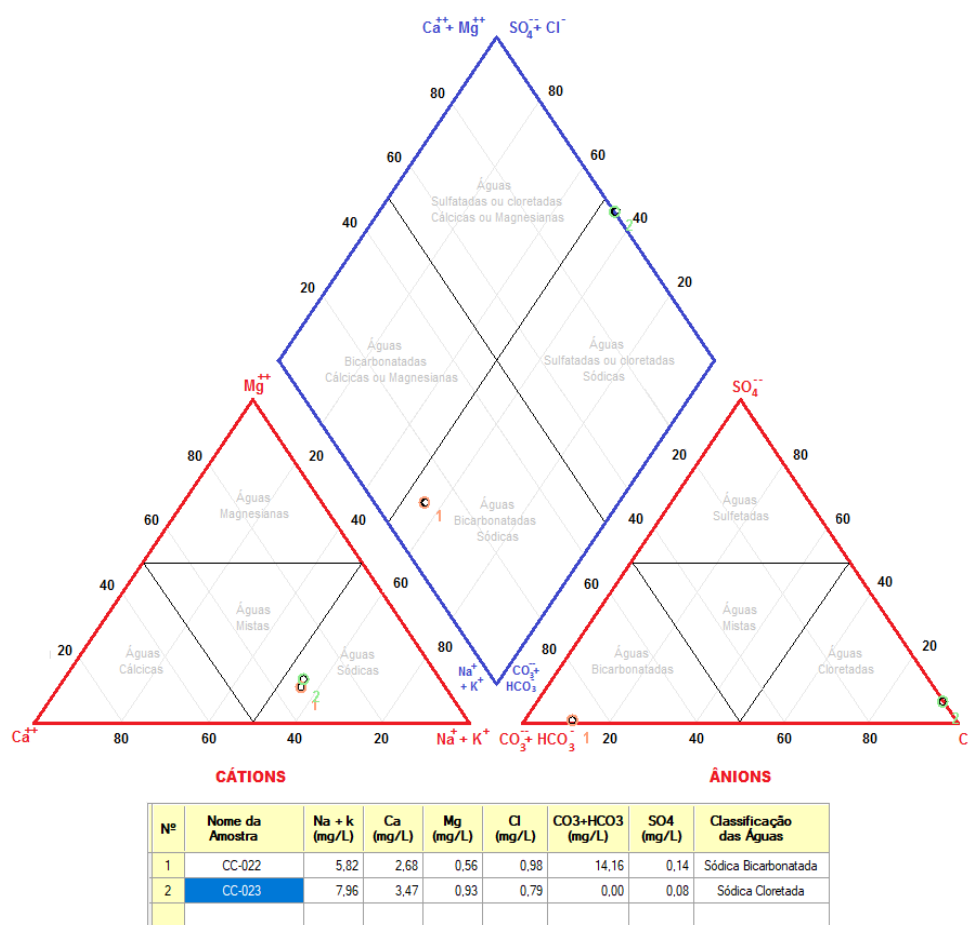


Figura 21 - Diagrama de Piper para as amostras de água subterrânea.

Tabela 7 - Resultados analíticos de água subterrânea coletada durante a campanha 4 (jul/2019).

Análise de Água Subterrânea				
	Elementos / Parâmetros	CC-022	CC-023	CONAMA 396 (Consumo Humano*)
Grupo 1 Elementos regulados pela CONAMA 396	Al (mg/L)	0,0125	0,0101	0,2
	As (mg/L)	< LQ	< LQ	0,01
	B (mg/L)	< LQ	< LQ	0,5
	Ba (mg/L)	0,0358	0,0575	0,7
	Be (mg/L)	< LQ	< LQ	0,004
	Co (mg/L)	< LQ	< LQ	-
	Cd (mg/L)	< LQ	< LQ	0,005
	Cr (mg/L)	< LQ	< LQ	0,05
	Cu (mg/L)	< LQ	< LQ	2
	Fe (mg/L)	< LQ	< LQ	0,3
	Li (mg/L)	< LQ	0,0061	2,5 (irrigação)
	Mn (mg/L)	< LQ	< LQ	0,1
	Mo (mg/L)	< LQ	< LQ	0,07
	Ni (mg/L)	< LQ	< LQ	0,02
	Pb (mg/L)	< LQ	< LQ	0,01
	Sb (mg/L)	< LQ	< LQ	0,005
	Se (mg/L)	< LQ	< LQ	0,01
	V (mg/L)	< LQ	< LQ	0,05
	Zn (mg/L)	0,2593	0,2654	50
Grupo 2 Cátions principais	Ca (mg/L)	2,6768	3,4741	-
	K (mg/L)	1,7205	2,5488	-
	Mg (mg/L)	0,5619	0,9288	-
	Na (mg/L)	4,0959	5,4135	200
Grupo 3	Si (mg/L)	12,6234	15,7882	-
	Sr (mg/L)	0,0148	0,0308	-
	Ti (mg/L)	< LQ	< LQ	-
	Sn (mg/L)	< LQ	< LQ	-
Grupo 4 Ânions	F ⁻ (mg/L)	0,2100	0,1200	1,5
	Cl ⁻ (mg/L)	0,9800	0,7900	250
	NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,0400	0,0400	1
	Br ⁻ (mg/L)	0,0300	0,0200	-
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	3,9400	3,6600	10
	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0,1400	0,0800	250
	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	< LQ	< LQ	-
	CO ₃ ⁼ mg/L	0	0	-
	HCO ₃ ⁻ mg/L	14,16	0	-
	pH	6,4	6	-
	condutividade (microS/cm)	37,25	49,17	-

* Exceto quando especificado
<LQ = Menor que o limite de quantificação

5.4.2 Balanço Hídrico

No que diz respeito ao balanço hídrico, o sistema escolhido foi a bacia do ribeirão Ferro-Carvão e o período são os anos de 2015 a 2019 (ano do incidente). Como dito anteriormente no item 4.4, o balanço hídrico é importante para caracterizar o regime hídrico de um determinado sistema, sendo possível estimar valores de evapotranspiração real, déficit hídrico, excedente e o total de água retida no solo. Os gráficos a seguir apresentam esses resultados.

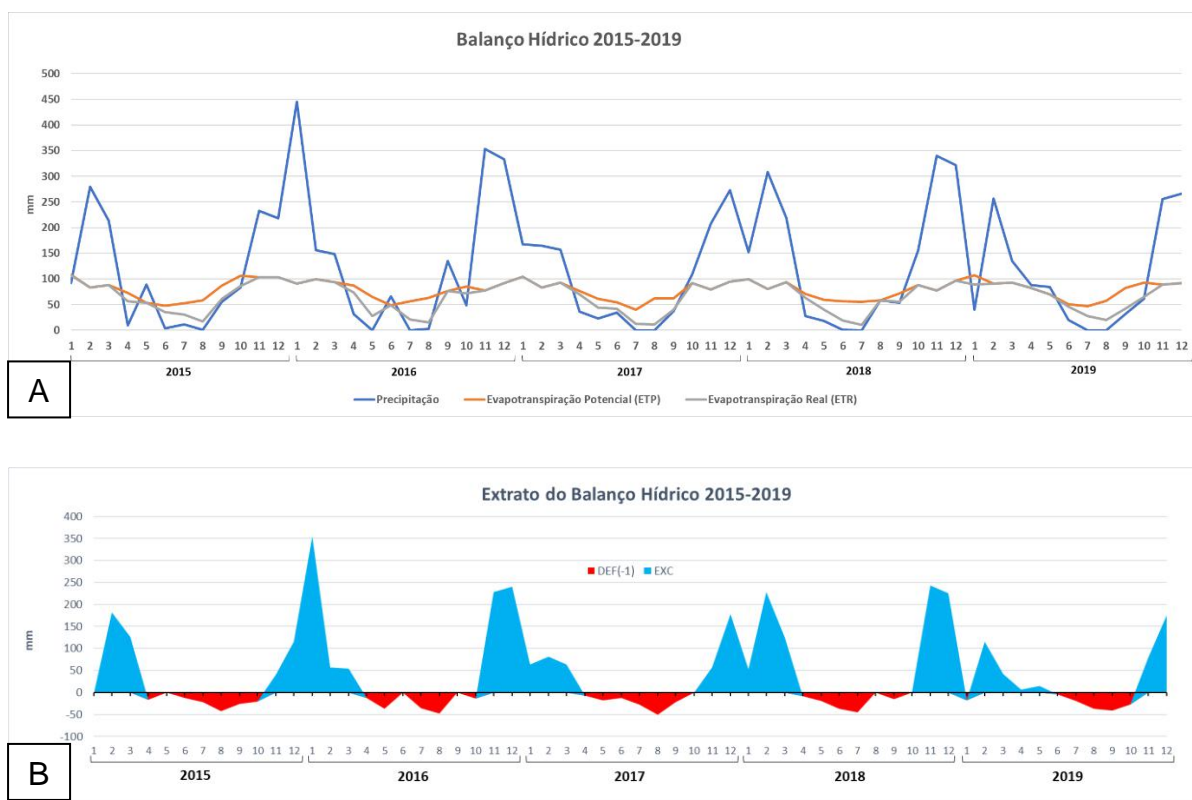


Figura 22 (A e B) - Gráficos obtidos do balanço hídrico. (A) representa a precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real. (B) representa o período de excedente e de déficit hídrico na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Pode-se observar na figura 22(A) que a precipitação no ano de 2019 foi a menor em 5 anos, com o mês de janeiro especialmente seco (mês do rompimento). A partir da figura 22(B) pode-se observar um padrão de anos alternados com maior e menor valores acumulados de excedente hídrico, sendo o ano de 2019 com o menor excedente do período analisado (ver tabela do apêndice B).

O valor da vazão média calculada na bacia do ribeirão Ferro-Carvão, com base nos excedentes anuais e a área da bacia, deu um valor médio de 630 L/s, sendo

compatível com valor de 600 L/s obtido através regionalização das vazões pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2019).

Como complemento ao balanço hídrico foi elaborado um modelo simplificado que indica o fluxo da água ao longo de uma seção SSW-NNE dentro da bacia, cortando a formação Cauê e o embasamento, que representam respectivamente o aquífero Cauê e o aquífero fraturado Centro-Sul, apresentados anteriormente no item 3.2.2.1. A medida de acamamento foi retirada do SIG do mapeamento organizado pela CODEMIG (2005) na escala 1:50.000, e os contatos são referentes ao mapa geológico da figura 11, em que a seção encontra-se marcada.

As setas indicam a provável direção de fluxo da água subterrânea, com maior fluxo vindo do Aquífero Cauê e menor no Fraturado Centro-Sul.

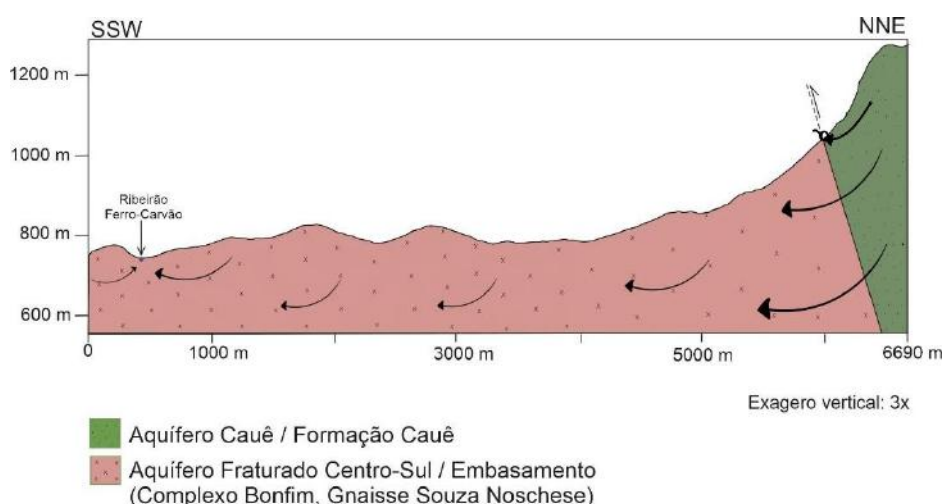


Figura 23 - Seção esquemática simplificada da bacia do ribeirão Ferro-Carvão com setas indicando a direção e intensidade do fluxo (localização marcada na figura 11).

5.5 Valores de *Background* de água superficial da bacia do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão

A partir de dados do ano de 2009, obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil para o Atlas Geoquímico da Bacia do São Francisco, foi possível isolar os dados da bacia hidrográfica do rio Paraopeba e obter o valor do *background* de água superficial da bacia (mediana dos valores). Além disso, o projeto APA Sul – RMBH (2005) coletou amostras de água superficial no ribeirão Ferro-Carvão e destacou três elementos que apareceram em valores mais elevados: Ca, Fe e Mn. Os demais não foram mencionados no trabalho por apresentarem valores abaixo do limite de detecção do

equipamento e abaixo das legislações ambientais (CUNHA & MACHADO, 2005). A tabela 10 exibe todas as informações anteriormente citadas em conjunto do resultado analítico do ponto JM-001 (ribeirão Ferro-Carvão) do Monitoramento Especial do rio Paraopeba.

A junção dos elementos analisados e dos elementos que são possíveis indicadores da presença de rejeito resultou nos elementos Fe, Mn e Sr. Não foi possível fazer comparações com os demais elementos devido à ausência de resultados analíticos para água superficial. As colunas das regiões 1, 2, 4 e 5 do gráfico abaixo (Figura 23) representam análises feitas no ribeirão Ferro-Carvão. As colunas da região 3 representam resultados de *background* da bacia do rio Paraopeba como um todo.

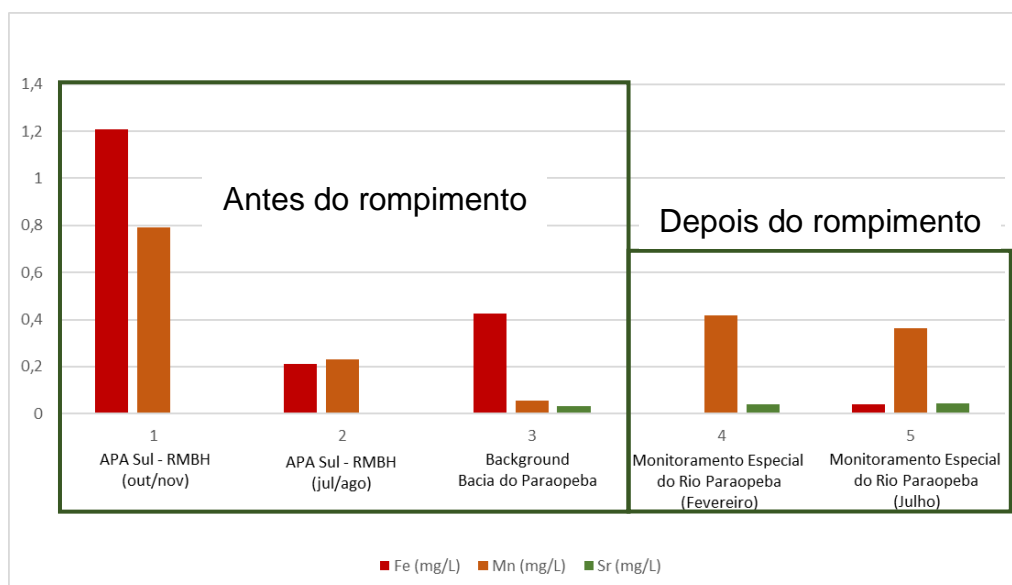


Figura 24 - Gráfico comparativo da concentração de Fe, Mn e Sr em água superficial.

A partir da figura 23 pode-se observar que anteriormente ao rompimento da Barragem 1 o ribeirão Ferro-Carvão já apresentava valores altos de Fe e Mn, que variam conforme a época da análise (devido à maior quantidade de material que é lixiviado para dentro das calhas das drenagens durante os períodos de chuva (CUNHA & MACHADO, 2005)). Alguns desses valores inclusive ultrapassam o estabelecido pela CONAMA 357 (0,3 mg/L para Fe e 0,1 mg/L para Mn). Um motivo para esses altos valores em água pode ser a característica natural da região de possuir elevado teor de ferro e manganês, interferência das minerações ao redor ou ambos.

Tabela 8 - Dados de referência de análises anteriores ao rompimento da Barragem.
(Atlas BSF e APA Sul)

Parâmetros físico-químicos e elementos	APA Sul RMBH (2005)		Atlas Bacia do rio São Francisco (2009)	Monitoramento especial do rio Paraopeba (2019)	
	Ribeirão Ferro Carvão		Bacia do Paraopeba	Ribeirão Ferro Carvão	
	Out/Nov	Jul/Ago	<i>background</i> da bacia	Fevereiro	Julho
pH	7.5	7	6.73	6.5	6.58
OD (mg/L)			5.86	8.06	NA
Condut. (µs/cm)		36	72.1	140.4	79.65
Al (mg/L)			0.034	ND	0.043
As (mg/L)			0.0001	ND	NA
B (mg/L)			0.0001	<LQ	NA
Ba (mg/L)			0.022	<LQ	<0,010
Be (mg/L)			0.0001	ND	NA
Ca (mg/L)	3.56	3.57	7.568	11.167	23.818
Cd (mg/L)			0.0001	ND	NA
Co (mg/L)			0.0001	ND	NA
Cr (mg/L)			0.0001	ND	NA
Cu (mg/L)			0.0001	ND	NA
Fe (mg/L)	1.21	0.21	0.425	X	0.038
Hg (mg/L)			0	< 0,0005	NA
K (mg/L)			1.056	2.2328	1.965
Li (mg/L)			0.0001	<LQ	NA
Mg (mg/L)			1.132	3.7098	3.201
Mn (mg/L)	0.79	0.23	0.055	0.4166	0.363
Mo (mg/L)			0.0001	ND	NA
Na (mg/L)			4.73	1.7625	3.252
Ni (mg/L)			0.0001	<LQ	NA
Pb (mg/L)			0.0001	ND	NA
Sb (mg/L)			0.0001	<LQ	NA
Se (mg/L)			0.0001	ND	NA
Si (mg/L)			13.9	1.2517	7.910
Sn (mg/L)			0.0001	ND	NA
Sr (mg/L)			0.03281	0.0387	0.044
Ti (mg/L)			0.0001	ND	NA
V (mg/L)			0.0001	0.005	NA
Zn (mg/L)			0.0001	ND	0.067
Brometo (mg/L)			0.0001	0.1076	NA
Cloreto (mg/L)			0.99	1.4551	NA
Fluoreto (mg/L)			0.044	<LQ	NA
Fosfato (mg/L)			0.0001	0.0923	NA
Nitrato (mg/L)			0.68	0.9654	NA
Nitrito (mg/L)			0.01	0.0972	NA
Sulfato (mg/L)			0.28	ND	NA

6. CONCLUSÃO

O estudo propôs a análise dos elementos químicos presentes no rejeito depositado na bacia do ribeirão Ferro-Carvão após o rompimento da Barragem I e do sedimento presente na calha do rio Paraopeba à montante e à jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, para obter elementos indicativos da presença ou ausência da influência do rejeito nas amostras de água, além de uma caracterização geral da área de estudo.

É inegável o grande impacto causado em diversas esferas pelo rompimento da Barragem 1 em Brumadinho. O impacto no âmbito humano e social na vida das pessoas é irrecuperável, foram mais de 250 vidas perdidas, e, consequentemente 250 famílias diretamente afetadas com o desastre.

Entretanto como foi exposto ao longo do desenvolvimento deste trabalho, resultados analíticos indicam que o dano do ponto de vista geoquímico ambiental não teve um impacto tão catastrófico quanto os outros. Boa parte das amostras de água que ultrapassaram o VMP da CONAMA 357 para rios de Classe 2 estão à montante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba, o que indica que o rio já estava previamente impactado por outras fontes distintas do rompimento. Considerando essa informação percebe-se a extrema importância do conhecimento das condições prévias (*background*) do local, pois é um parâmetro que permite mensurar o quanto o evento impactou naquele ambiente.

A história provavelmente teria sido outra se a dinâmica dos corpos d'água afetados fossem diferentes. Apesar de impactados principalmente com presença de Fe e Mn, não apresentam teores elevados de elementos traço que comumente são tóxicos a saúde humana e ao ambiente como um todo. De acordo com Guilherme et al. (2005), em rios relativamente não poluídos e de alta turbidez, como é o caso do rio Paraopeba, é comum haver uma maior proporção de elementos-traço na forma particulada (precipitado químico, coloides) do que na forma dissolvida. Isso é observado nas análises, no sedimento de fundo e no rejeito a presença de elementos traço é muito superior ao encontrado dissolvido na água de superfície.

O ferro e manganês presentes nos sedimentos e rejeito, em forma de óxidos e hidróxidos, tendem a adsorver metais e mantê-los na forma particulada até que

ocorram reações de redução e dissolução desses óxidos que liberem os metais catiônicos na água, como ocorre comumente em regiões anóxicas da interface água-sedimento em ambientes aquáticos de regimes não turbulentos (ex: lagos ricos em matéria orgânica) (GUILHERME et al., 2005). Isso não ocorre na área de influência dos pontos amostrados.

No que diz respeito à água subterrânea, mesmo com poucos dados, pode-se dizer que a influência do desastre é provavelmente muito pequena ou talvez nula, devido às características do material e da bacia como um todo. Não é comum na literatura impactos na água subterrânea relacionados a rompimento de barragem de rejeitos, ainda mais quando se trata de rejeitos não perigosos.

Vários trabalhos têm sido efetuados com o objetivo de recuperar os danos ambientais causados, como a dragagem para retirada do rejeito do canal do ribeirão Ferro-Carvão e do rio Paraopeba. Foi instalada uma cortina de estacas metálicas para contenção dos rejeitos na altura do ponto JM-001. Neste local a água do ribeirão Ferro-Carvão é captada e bombeada para uma estação de tratamento, em que passa por processos de filtração e remoção de sedimentos e posteriormente é devolvida para o ribeirão Casa Branca, um outro afluente do rio Paraopeba. Foram construídas barragens de enrocamento ao longo do ribeirão com o objetivo de imobilizar o rejeito que ainda resta no canal e que pode descer em direção ao rio Paraopeba em caso de chuvas mais intensas, além disso está sendo executado o reflorestamento da mata ciliar que foi arrancada com a deposição do rejeito.

Por fim, o presente trabalho observou de forma pontual e simplificada como a água superficial e, em parte, água subterrânea, foram afetadas pela presença do rejeito. É necessário um estudo que abranja todos os meios físicos, como solos e, com mais detalhe, a água subterrânea para conhecer a influência do rejeito de forma geral no ambiente físico.

7. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistemas Aquíferos. 2013. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Brasília, 2018, 34 p.
- ALKMIN, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29 – 58, 1998.
- BRUMADINHO. Secretaria Municipal de Educação. Coletânea Explorando & Conhecendo Brumadinho. Brumadinho: Prefeitura de Brumadinho. 2015. 98 p.
- CARDOSO et al. Mapa das áreas aflorantes dos aquíferos e sistemas aquíferos do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17., 2012, Bonito – Mato Grosso do Sul. Anais [...]. 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27744>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- CARNEIRO, Maurício Antonio. O complexo metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): litoestratigrafia de crosta continental do arqueano. 1992. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- CLIMATEMPO. Climatologia: Brumadinho-MG. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/3621/brumadinho-mg>. Acesso em: 11 jun. 2020
- CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2005.
- CONAMA. Resolução nº 396, de 03 de abril de 2008. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2008.
- CONAMA. Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2012.
- COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995. Minas Gerais: SEMAD. 1995.
- CORDANI, U. G. A formação do geólogo brasileiro numa sociedade em transformação - a proposta da Universidade de São Paulo, *A Terra em Revista*, Belo Horizonte, v.3, n. 3., 1997.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. SIG de Geodiversidade do Estado de Minas Gerais. 2010. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14704>.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba. Relatório 1 – Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico. Belo Horizonte, MG: CPRM, 2019. 74 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba. Relatório 3 – Monitoramento Geoquímico. Belo Horizonte, MG: CPRM, 2019. 43 p.

CUNHA, F. G.; MACHADO, G. J. Geoquímica Ambiental. In: CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Apa Sul RMBH – Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005. v. 7, 80 p.

DOOR, J. V. N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of tge Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A. U.S. Geological Survey. p. 1-110, 1969

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO J. G. A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM. 2008. 812 p.

FRIZZO, S. J., LICHT, O. A. B. Estatística uni e bivariadas aplicadas à prospecção geoquímica. In: LICHT, O. A. B., DEMELLO, C. S. B., DA-SILVA, C. R. (eds). Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica (SBGq) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2007. 788p

GIRODO A. C. Mineração, escala 1:50.000. In: CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Apa Sul RMBH – Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005. v. 2, 168 p.

GOMES, Marcos Antônio. Caracterização do rejeito de minério de ferro da mina Córrego do Feijão. Minas Gerais. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

GONÇALVES, J. A. C. et al. O arsênio nas águas subterrâneas de Ouro Preto (MG). In: SILVA, C. R.; FIGUEIREDO, B. R.; CAPITANI, E. M.; CUNHA, Fernanda Gonçalves. Geologia Médica no Brasil. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/geo_med11.pdf. Acesso em: 10 jun. 2020.

GUILHERME, L. R. G. et al. Elementos-Traço em Solos e Sistemas Aquáticos. Tópicos Ci. Solo, n. 4, p. 345 – 390, 2005.

IGAM. Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (SF3). Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf3>>. Acesso em: 16 set. 2019.

KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry, n. 51, p. 229 – 245, 2014.

LICHT, Otavio Augusto Boni. Prospecção Geoquímica: princípios, técnicas e métodos. Rio de Janeiro: CPRM, 1998. 236 p.

LOBATO, L. M. et al. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#col-form-download-tab>

ROBERTSON, P. K. et al. Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão. 2019. Disponível em: <http://www.b1technicalinvestigation.com/>. Acesso em: 16 dez. 2019.

MATSCHULLAT, J.; OTTENSTEIN, R.; REIMANN, C. Geochemical background – can we calculate it?. *Environmental Geology*, v. 39, n. 9, p. 990 – 1000, 2000.

MOREIRA-NORDEMANN. L. M. A geoquímica e meio ambiente. *Geochimica Brasiliensis*, v. 1, n. 1, p. 89-107, 1987.

MEDINA, A. I. M.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Geomorfologia. In: CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Apa Sul RMBH – Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005. v. 6, 54 p.

MOURÃO, Maria Antonieta Alcântara. Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. 2007. 297 f. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W.; MACHADO, N. Geoquímica dos gnaisses TTGs e granitóides neoarqueanos do complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 1, p. 25 – 32, 1997.

NAVARRO, R. F. A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. v. 1, n. 1, p. 01 – 11, 2006.

RODRIGUES, A. S. L. R.; NALINI Jr. H. A. Valores de *background* geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 62, n. 2, p. 155-165, 2009.

SANTOS, A. C. Noções de Hidrogeoquímica. In: FEITOSA, F. A. C. et al. (Org.). *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, Cap. 5.1, p. 325 – 357, 2008.

SENAC MINAS. Informações Básicas – Brumadinho. Disponível em: <http://www.descubraminas.com.br/Turismo/DestinoPagina.aspx?cod_destino=170&cod_pgi=2605>. Acesso em: 20 ago. 2019

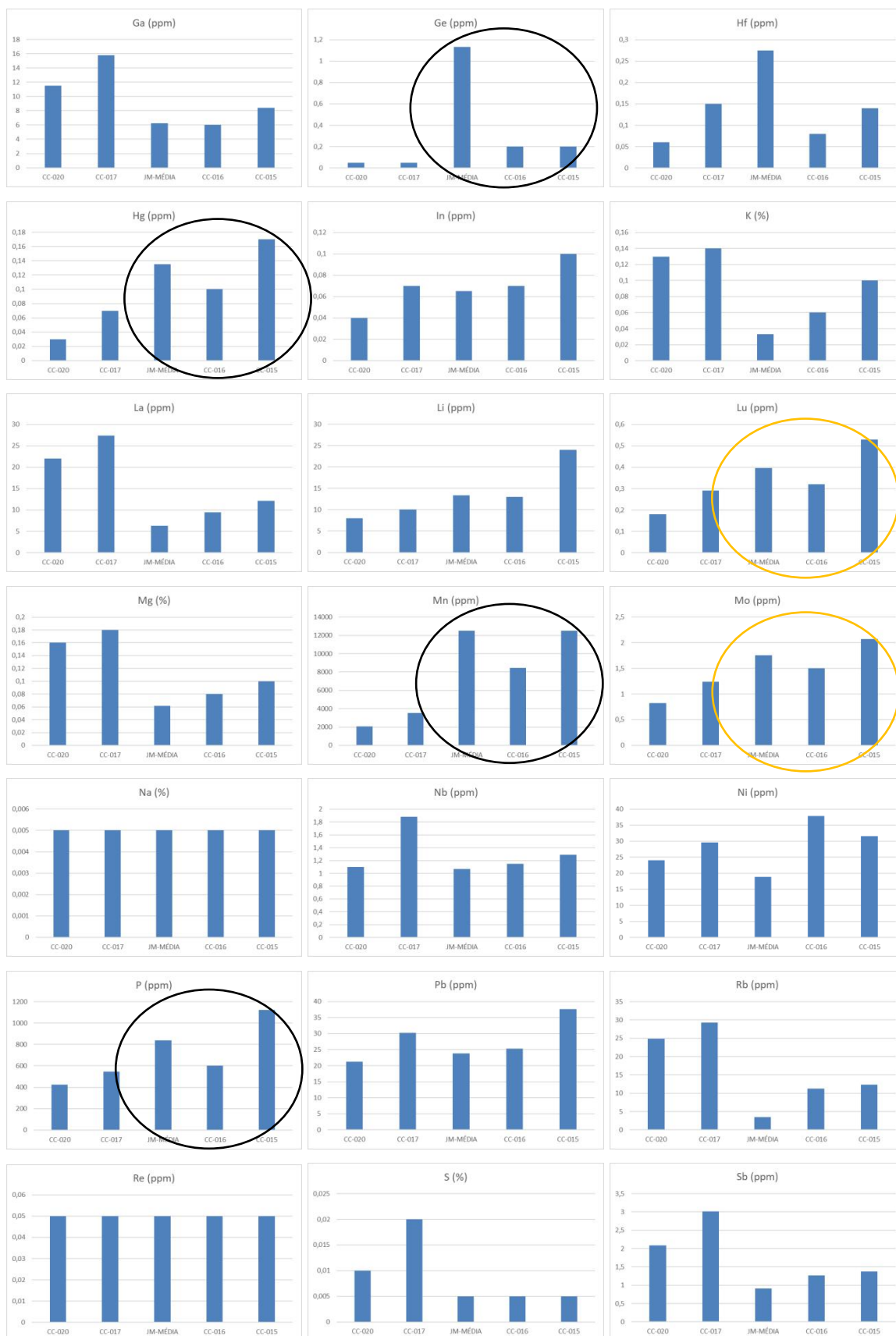
VIGLIO, E. P.; CUNHA, F. G da. Atlas geoquímico da bacia do Rio São Francisco: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM. 2018. 238 p.

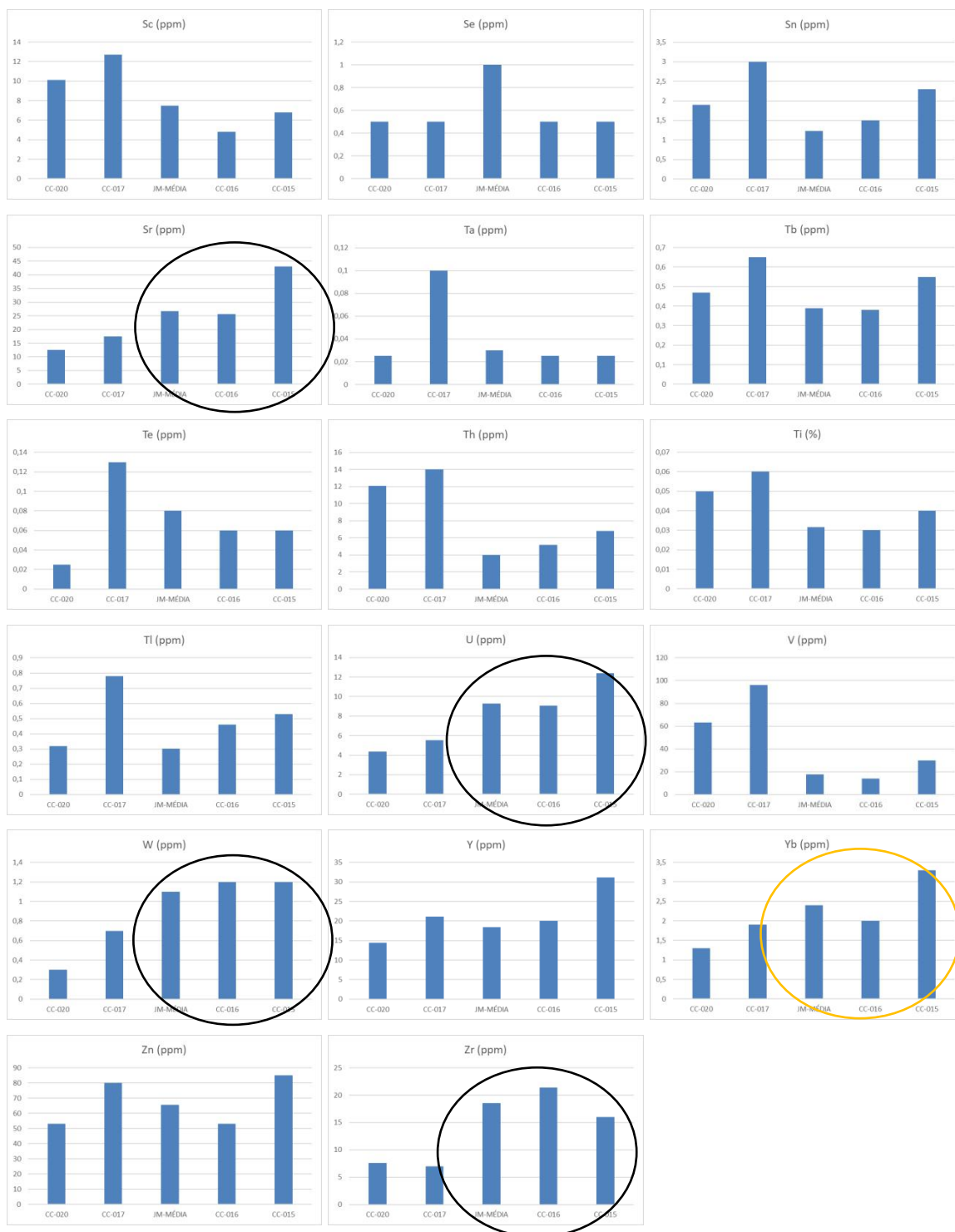
UHLEIN, A.; NOCE, C. M. Quadrilátero Ferrífero. In: HASUI et al. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca. 2012. p 228 – 235.

APÊNDICE A

Gráficos de comparação da média do rejeito pós rompimento em relação às concentrações dos elementos em sedimento de fundo de pontos a montante e a jusante do ribeirão Ferro-Carvão no mês de fevereiro. Círculos na cor laranja representam elementos com baixo contraste visual de concentrações “montante x local x jusante” e em preto com maior contraste.







APÊNDICE B

2015	Meses	Num de dias	T (°C) Atual	P (mm)	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP (mm)	INÍCIO	NEG-AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)	
	jan	30.00	23.03	91.40	13.19	10.10	2.28	108.54	-17.14	Início	-17.14	84.25	-15.75	107.15	1.39	0.00	
	fev	28.00	21.30	280.00	12.90	8.97	2.28	82.93	197.07		0.00	100.00	15.75	82.93	0.00	181.32	
	mar	31.00	21.22	213.60	12.42	8.92	2.28	87.74	125.86		0.00	100.00	0.00	87.74	0.00	125.86	
	abr	30.00	20.24	9.60	11.82	8.30	2.28	72.52	-62.92		-62.92	53.30	-46.70	56.30	16.22	0.00	
	mai	31.00	17.85	88.60	11.27	6.87	2.28	53.71	34.89		-12.57	88.19	34.89	53.71	0.00	0.00	
	jun	30.00	17.53	3.40	10.88	6.68	2.28	48.11	-44.71		-57.28	56.39	-31.79	35.19	12.92	0.00	
	jul	31.00	18.05	11.40	10.80	6.98	2.28	52.73	-41.33		-98.61	37.30	-19.09	30.49	22.24	0.00	
	ago	31.00	18.71	0.60	11.08	7.37	2.28	58.75	-58.15		-156.76	20.85	-16.45	17.05	41.70	0.00	
	set	30.00	22.11	55.80	11.60	9.50	2.28	87.08	-31.28		-188.04	15.25	-5.60	61.40	25.68	0.00	
	out	31.00	23.32	83.00	12.19	10.29	2.28	106.68	-23.68		-211.72	12.04	-3.22	86.22	20.46	0.00	
	nov	30.00	22.90	232.40	12.75	10.02	2.28	103.68	128.72		0.00	100.00	87.96	103.68	0.00	40.76	
	dez	31.00	22.23	218.60	13.13	9.57	2.28	103.06	115.54		0.00	100.00	0.00	103.06	0.00	115.54	
	TOTAIS		248.49	1288.40	144.04	103.58	27.34	965.53	322.87			767.58	0.00	824.92	140.61	463.48	
	MÉDIAS		20.71	107.37	12.00	8.63	2.28	80.46	26.91			63.97		68.74	11.72	38.62	
	2016	Meses	Num de dias	T (°C) Atual	P (mm)	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP (mm)	INÍCIO	NEG-AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
		jan	30.00	21.23	445.20	13.19	8.93	2.22	91.33	353.87	Início	0.00	100.00	0.00	91.33	0.00	353.87
fev		28.00	23.00	156.20	12.90	10.08	2.22	99.55	56.65	0.00		100.00	0.00	99.55	0.00	56.65	
mar		31.00	21.75	148.00	12.42	9.26	2.22	93.76	54.24	0.00		100.00	0.00	93.76	0.00	54.24	
abr		30.00	21.80	31.60	11.82	9.29	2.22	86.82	-55.22	-55.22		57.57	-42.43	74.03	12.79	0.00	
mai		31.00	19.29	0.20	11.27	7.72	2.22	65.16	-64.96	-120.18		30.06	-27.50	27.70	37.46	0.00	
jun		30.00	17.41	66.00	10.88	6.61	2.22	48.48	17.52	-74.26		47.59	17.52	48.48	0.00	0.00	
jul		31.00	18.47	0.00	10.80	7.23	2.22	56.74	-56.74	-131.00		26.98	-20.60	20.60	36.13	0.00	
ago		31.00	19.11	3.00	11.08	7.61	2.22	62.76	-59.76	-190.76		14.84	-12.14	15.14	47.62	0.00	
set		30.00	20.77	135.40	11.60	8.64	2.22	76.54	58.86	-30.51		73.71	58.86	76.54	0.00	0.00	
out		31.00	20.98	49.20	12.19	8.77	2.22	84.93	-35.73	-66.24		51.56	-22.14	71.34	13.59	0.00	
nov		30.00	19.98	353.20	12.75	8.15	2.22	77.15	276.05	0.00		100.00	48.44	77.15	0.00	227.61	
dez		31.00	21.07	333.20	13.13	8.83	2.22	92.32	240.88	0.00		100.00	0.00	92.32	0.00	240.88	
TOTAIS			244.87	1721.20	144.04	101.13	26.65	935.54	785.66			802.32	0.00	787.95	147.59	933.25	
MÉDIAS			20.41	143.43	12.00	8.43	2.22	77.96	65.47			66.86		65.66	12.30	77.77	
2017		Meses	Num de dias	T (°C) Atual	P (mm)	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP (mm)	INÍCIO	NEG-AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
		jan	30.00	22.33	168.00	13.19	9.64	2.11	103.90	64.10	Início	0.00	100.00	0.00	103.90	0.00	64.10
	fev	28.00	20.97	165.00	12.90	8.76	2.11	83.01	81.99	0.00		100.00	0.00	83.01	0.00	81.99	
	mar	31.00	21.44	156.80	12.42	9.06	2.11	92.75	64.05	0.00		100.00	0.00	92.75	0.00	64.05	
	abr	30.00	20.38	36.40	11.82	8.39	2.11	76.78	-40.38	-40.38		66.78	-33.22	69.62	7.16	0.00	
	mai	31.00	18.50	22.80	11.27	7.25	2.11	61.67	-38.87	-79.24		45.28	-21.51	44.31	17.36	0.00	
	jun	30.00	18.01	34.20	10.88	6.96	2.11	54.39	-20.19	-99.43		37.00	-8.28	42.48	11.91	0.00	
	jul	31.00	15.41	0.00	10.80	5.50	2.11	40.13	-40.13	-139.56		24.77	-12.23	12.23	27.90	0.00	
	ago	31.00	18.72	0.00	11.08	7.38	2.11	62.17	-62.17	-201.73		13.30	-11.47	11.47	50.71	0.00	
	set	30.00	18.58	36.80	11.60	7.29	2.11	61.94	-25.14	-226.88		10.34	-2.96	39.76	22.19	0.00	
	out	31.00	21.59	109.20	12.19	9.16	2.11	92.33	16.87	-130.14		27.21	16.87	92.33	0.00	0.00	
	nov	30.00	19.93	208.20	12.75	8.12	2.11	79.00	129.20	0.00		100.00	72.79	79.00	0.00	56.41	
	dez	31.00	21.12	272.80	13.13	8.86	2.11	95.00	177.80	0.00		100.00	0.00	95.00	0.00	177.80	
	TOTAIS		236.99	1210.20	144.04	96.37	25.36	903.07	307.13			724.68	0.00	765.85	137.22	444.35	
	MÉDIAS		19.75	100.85	12.00	8.03	2.11	75.26	25.59			60.39		63.82	11.43	37.03	
	2018	Meses	Num de dias	T (°C) Atual	P (mm)	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP (mm)	INÍCIO	NEG-AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
		jan	30.00	21.95	152.40	13.19	9.39	2.14	99.68	52.72	Início	0.00	100.00	0.00	99.68	0.00	52.72
fev		28.00	20.69	308.20	12.90	8.58	2.14	80.18	228.02	0.00		100.00	0.00	80.18	0.00	228.02	
mar		31.00	21.58	218.80	12.42	9.15	2.14	93.65	125.15	0.00		100.00	0.00	93.65	0.00	125.15	
abr		30.00	19.69	27.60	11.82	7.96	2.14	70.85	-43.25	-43.25		64.89	-35.11	62.71	8.14	0.00	
mai		31.00	18.29	18.00	11.27	7.12	2.14	59.62	-41.62	-84.87		42.80	-22.09	40.09	19.53	0.00	
jun		30.00	18.33	0.60	10.88	7.15	2.14	55.94	-55.34	-140.21		24.61	-18.19	18.79	37.15	0.00	
jul		31.00	18.10	0.00	10.80	7.01	2.14	55.89	-55.89	-196.10		14.07	-10.54	10.54	45.36	0.00	
ago		31.00	18.20	58.80	11.08	7.07	2.14	57.99	0.81	-190.52		14.88	0.81	57.99	0.00	0.00	
set		30.00	19.95	53.40	11.60	8.13	2.14	71.54	-18.14	-208.66		12.41	-2.47	55.87	15.67	0.00	
out		31.00	21.14	155.40	12.19	8.87	2.14	87.89	67.51	-22.41		79.92	67.51	87.89	0.00	0.00	
nov		30.00	19.86	340.40	12.75	8.07	2.14	77.85	262.55	0.00		100.00	20.08	77.85	0.00	242.47	
dez		31.00	21.33	321.60	13.13	8.99	2.14	96.47	225.13	0.00		100.00	0.00	96.47	0.00	225.13	
TOTAIS			239.10	1655.20	144.04	97.50	25.66	907.56	747.64			753.58	0.00	781.71	125.85	873.49	
MÉDIAS			19.92	137.93	12.00	8.13	2.14	75.63	62.30			62.80		65.14	10.49	72.79	
2019		Meses	Num de dias	T (°C) Atual	P (mm)	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP (mm)	INÍCIO	NEG-AC	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
		jan	30.00	22.90	39.80	13.19	10.02	2.26	107.51	-67.71	Início	-67.71	50.81	-49.19	88.99	18.52	0.00
	fev	28.00	22.19	256.40	12.90	9.54	2.26	91.32	165.08	0.00		100.00	49.19	91.32	0.00	115.89	
	mar	31.00	21.74	135.20	12.42	9.26	2.26	93.08	42.12	0.00		100.00	0.00	93.08	0.00	42.12	
	abr	30.00	21.33	88.40	11.82	8.99	2.26	82.09	6.31	0.00		100.00	0.00	82.09	0.00	6.31	
	mai	31.00	19.95	84.00	11.27	8.13	2.26	69.57	14.43	0.00		100.00	0.00	69.57	0.00	14.43	
	jun	30.00	17.86	19.80	10.88	6.87	2.26	50.57	-30.77	-30.77		73.51	-26.49	46.29	4.28	0.00	
	jul	31.00	16.99	0.00	10.80	6.37	2.26	46.37	-46.37	-77.14		46.24	-27.27	27.27	19.09	0.00	
	ago	31.00	18.48	0.00	11.08	7.24	2.26	57.48	-57.48	-134.62		26.02	-20.22	20.22	37.27	0.00	
	set	30.00	21.53	31.40	11.60	9.12	2.26	82.26	-50.86	-185.48		15.65	-10.37	41.77	40.49	0.00	
	out	31.00	21.90	61.00	12.19	9.36	2.26	92.73	-31.73	-217.22		11.39	-4.25	65.25	27.48	0.00	
	nov	30.00	21.37	256.00	12.75	9.02	2.26	88.90	167.10	0.00		100.00	88.61	88.90	0.00	78.49	
	dez	31.00	21.08	266.60	13.13	8.83	2.26	91.67	174.93	0.00		100.00	0.00	91.67	0.00	174.93	
	TOTAIS		247.33	1238.60	144.04	102.75	27.10	953.56	285.04			823.62	0.00	806.43	147.13	432.17	
	MÉDIAS		20.61	103.22	12.00	8.56	2.26	79.46	23.75			68.63		67.20	12.26	36.01	